

Grado en Ingeniería Mecánica

Curso académico 2017 – 2018

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO, ANÁLISIS Y PROTOTIPADO RÁPIDO DE UN
PLATO DE 4 GARRAS MANUALES**

Autor:

Daniel Navarrete Abad

Tutor:

Enrique Soriano Heras

Leganés, Septiembre de 2018

Título: **Diseño, análisis y prototipado rápido de un plato de 4 garras manuales**

Autor: **Daniel Navarrete Abad**

Tutor: **Enrique Soriano Heras**

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y del Trabajo Fin de Grado el día __ de _____ del 20__
en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

En primer lugar, dar las gracias a mi madre, Pilar, por su amor y apoyo incondicional, pero sobre todo por ser el espejo donde mirarme; a mi hermana, Zaida, por ayudarme, enseñarme y apoyarme siempre; y a mi padre, Javier, por estar siempre al pie del cañón.

Agradecer a mis abuelos, Consuelo y Félix, por su constante preocupación.

Por último, dar las gracias a dos compañeros de clase, dos amigos, Eduardo y Rubén, sin los cuales no hubiese sido tan entretenido y bonito este camino por la universidad; por esas tardes de prácticas, muchas risas y gafes.

Resumen

Durante el desarrollo de este trabajo fin de grado se persigue de diseñar, analizar y realizar un prototipado rápido de un mandrino de sujeción de cuatro garras manuales independientes.

Este trabajo fin de grado persigue el desarrollo e implementación de un nuevo sistema de sujeción para operaciones de torneado realizado en plástico mediante impresión 3D.

El método empleado para desarrollar correctamente este trabajo ha sido en primer lugar el diseño en CAD, de un plato de amarre de cuatro garras, posteriormente, la fabricación en una impresora 3D mediante la tecnología de fabricación con filamento fundido, FFF, y empleando como material ácido poliláctico, PLA, seguidamente, se han empleado el método analítico y numérico mediante elementos finitos; y finalmente, se ha desarrollado un presupuesto para la posible comercialización del producto.

La implicación práctica de este trabajo es la posibilidad de implementación de un útil de amarre para operaciones de torneado que no se ha desarrollado previamente en material de impresión 3D de bajo coste.

Los resultados analíticos indican que se trata de un modelo que, según las condiciones impuestas, se puede desarrollar y estudiar dinámicamente en futuros trabajos, ya que cumple los requisitos establecidos.

Palabras clave: Torno, sistema de sujeción, útil de amarre, plato de cuatro garras, diseño, impresión 3D, elementos finitos.

Abstract

The development of this final degree project pursues the desing, analyzes and make a rapid prototyping of a four jaw manual and independent chuck.

The goal of this final degree project is the development and implementation of a new clamping system for lathe made of plastic using 3D printing.

The method used to develop this Project has been in the first place the CAD desing, of a four jaw chuck, then, the manufacturing on a 3D printer using fused filament fabrication, FFF, and using as material polylactic acid, PLA, next step was to use the analytical method and the numerical method using finite; and finally, a budget has been developed to be able to market the product.

The practical implication of this final degree project is the possibility of implemeting a new clamping system for lathe that it hasn't been previously developed made of low cost 3D printing material.

The results indicate that it is a model that, according to the imposed conditions, could be developed and could be stutied dynamically in future project because the model satisfies the established requirements

Key words: Lathe, clamping system, four jaw chuck, desing, 3D printing, finite elements.

Índice general

Introducción y objetivos.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estructura de la memoria	3
1.4 Recursos empleados.....	4
1.5 Cronograma de la realización del trabajo	5
1.5.1 Diagrama de Gantt.....	5
1.6 Estado de la técnica.....	6
1.6.1 Teoría del mecanizado.....	6
1.6.1.1 Tipos de mecanizado	6
1.6.2 Torneado y sistemas de sujeción	8
Diseño del plato.....	15
2.1 Diseño en Solidworks 2017	15
2.2 Ensamblaje en Solidworks 2017	29
Fabricación usando impresión 3D	31
3.1 Técnicas de impresión 3D.....	31
3.2 Tipos de materiales para impresión 3D	35
3.3 Técnica de impresión empleada y material empleado	38
3.4 Impresora utilizada	40
3.5 Plato de garras impreso en 3D	45
Metodología.....	48
4.1 Método analítico	48

4.2	Método de los elementos finitos	56
4.2.1	Introducción a los elementos finitos	56
4.2.2	Historia de los elementos finitos	56
4.2.3	Ventajas y desventajas	57
4.2.4	Modelo de los elementos finitos	58
Resultados y análisis		67
5.1	Resultados obtenidos	67
5.1.1	Resultados método analítico	67
5.1.2	Resultados método numérico	68
Presupuesto		76
6.1	Costes para la realización del proyecto	76
6.1.1	Coste directo del proyecto	77
6.1.2	Coste indirecto del proyecto	80
6.1.3	Coste total de la realización del proyecto	80
6.1.4	Coste de fabricación y precio de venta del producto	80
Conclusiones		84
7.1	Conclusiones del trabajo	84
7.2	Trabajos futuros	85
BIBLIOGRAFÍA		86
ANEXO: PLANOS		89

Índice de figuras

Figura 1.1 – Gráfico de la evolución de la capacidad industrial en España.....	1
Figura 1.2 – Gráfico de la inversión vs capacidad usada.....	2
Figura 1.3 – Diagrama de Gantt para procesos del trabajo.....	5
Figura 1.4 – Diagrama de Gantt para el desarrollo de la memoria.....	6
Figura 1.5 – Torno paralelo.....	8
Figura 1.6 – Operación de torneado exterior.....	9
Figura 1.7 – Plato de tres y cuatro garras.....	12
Figura 1.8 – Componentes del torno paralelo.....	13
Figura 2.1 – Superficies de vaciado en el cuerpo del plato.....	16
Figura 2.2 – Boceto de vía de la garra en el cuerpo del plato.....	16
Figura 2.3 – Boceto para vaciado tuercas en el cuerpo del plato.....	17
Figura 2.4 – Cuerpo del plato.....	18
Figura 2.5 – Boceto esquina garra.....	19
Figura 2.6 – Boceto amarre cilíndrico en la garra.....	20
Figura 2.7 – Boceto amarre cilíndrico 2 en la garra.....	20
Figura 2.8 – Boceto extremo garra.....	20
Figura 2.9 – Boceto de incisiones en la garra.....	21
Figura 2.10 – Boceto vaciado para rosca en la garra.....	21
Figura 2.11 – Garra con la extrusión de la rosca.....	22
Figura 2.12 – Garra.....	22

Figura 2.13 – Tornillo movedor de la garra.....	23
Figura 2.14 – Boceto superficie superior en la sujeción del tornillo.....	24
Figura 2.15 – Boceto para vaciado en la sujeción del tornillo.....	24
Figura 2.16 – Sujeción del tornillo.....	25
Figura 2.17 – Boceto cuerpo tornillo inferior largo.....	25
Figura 2.18 – Boceto sobre plano 1 del tornillo inferior largo.....	26
Figura 2.19 – Boceto sobre plano 2 en el tornillo inferior largo.....	26
Figura 2.20 – Tornillo inferior largo.....	27
Figura 2.21 – Boceto para vaciado llave ALLEN.....	28
Figura 2.22 – Tornillo inferior pequeño.....	28
Figura 2.23 – Ensamblaje total en Solidworks 2017.....	29
Figura 2.24 – Ensamblaje sin plato en Solidworks 2017.....	30
Figura 2.25 – Vista explosionado.....	30
Figura 3.1 – Funcionamiento de la FFF.....	32
Figura 3.2 – Material PLA Ultimaker.....	39
Figura 3.3 – Impresora Ultimaker 3 Extended.....	41
Figura 3.4 – Cabezal con doble extrusor.....	42
Figura 3.5 – Entorno de trabajo del software CURA.....	43
Figura 3.6 – Tornillo movedor de la garra impreso en 3D.....	44
Figura 3.7 – Cuerpo del plato impreso en 3D.....	45
Figura 3.8 – Garra impreso en 3D.....	45
Figura 3.9 – Tornillo movedor de la garra impreso en 3D.....	46
Figura 3.10 – Sujeción tornillo movedor de la garra impreso en 3D.....	46
Figura 3.11 – Tornillo inferior largo impreso en 3D.....	46
Figura 3.12 – Tornillo inferior pequeño impreso en 3D.....	47

Figura 3.13 – Plato completo impreso en 3D.....	47
Figura 4.1 – Fuerzas y momentos en un plato de garras.....	49
Figura 4.2 – Entorno de trabajo Static Structural.....	58
Figura 4.3 – Geometry en ANSYS.....	59
Figura 4.4 – Model en ANSYS.....	59
Figura 4.5 – Mallado del plato en ANSYS.....	61
Figura 4.6 – Mallado en detalle en ANSYS.....	61
Figura 4.7 – Velocidad angular en ANSYS.....	62
Figura 4.8 – Momento torsor en ANSYS.....	63
Figura 4.9 – Fuerza de amarre acero – acero en ANSYS.....	64
Figura 4.10 – Resumen acero – acero en ANSYS.....	64
Figura 4.11 – Fuerza de amarre PLA – acero en ANSYS.....	65
Figura 4.12 – Resumen PLA – acero en ANSYS.....	65
Figura 4.13 – Restricción de movimiento en ANSYS.....	66
Figura 5.1 – Tensión equivalente Von-Mises en acero – acero.....	69
Figura 5.2 – Valor tensión equivalente Von-Mises en acero – acero.....	70
Figura 5.3 – Deformación total en acero – acero.....	71
Figura 5.4 – Valores deformación total en acero – acero.....	71
Figura 5.5 – Tensión equivalente Von-Mises en PLA – acero.....	73
Figura 5.6 – Valor tensión equivalente Von-Mises en PLA – acero.....	73
Figura 5.7 – Deformación total en PLA – acero.....	74
Figura 5.8 – Valores deformación total en PLA – acero.....	75
Figura 6.1 – Gráfico relación PVP vs Cantidad de unidad.....	79

Índice de tablas

Tabla 2.1 – Dimensiones del cuerpo del plato.....	15
Tabla 2.2 – Dimensiones de la garra.....	19
Tabla 3.1 – Resumen comparación de las principales tecnologías de impresión 3D....	35
Tabla 3.2 – Tabla resumen propiedades mecánicas del PLA.....	40
Tabla 3.3 – Resumen de la selección.....	40
Tabla 3.4 – Dimensiones físicas impresora Ultimaker 3 Extended.....	42
Tabla 3.5 – Dimensiones bandeja de impresora Ultimaker 3 Extended.....	42
Tabla 4.1 – Propiedades del acero estructural empleadas.....	60
Tabla 4.2 – Propiedades del PLA empleadas.....	60
Tabla 6.1 – Datos de costes de equipos utilizados.....	79

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Este trabajo fin de grado está relacionado con el sector industrial; por lo que en primer lugar, se va a poner en posición el estado actual de dicho sector en España.

Según el artículo “España está al límite de su capacidad industrial” publicado en el periódico electrónico “El Confidencial”, el cual se basa en datos de la “Encuesta de coyuntura industrial” elaborada por el Ministerio de Economía, Industria y Mercado; España tiene el 80% de sus recursos industriales en funcionamiento, siendo este el dato más alto desde el tercer trimestre de 2008, como se observa en la figura 1.1, justo antes de que se produjese una crisis económica mundial. [\[1\]](#)



Figura 1.1 – Gráfico de la evolución de la capacidad industrial en España

Fuente: El confidencial – España está al límite de su capacidad industrial

Como se puede observar, la capacidad industrial en España empezó un gran descenso cuando comenzaba la crisis económica mundial, pero a partir del año 2013 se comenzó con un ascenso casi consecutivo.

Debido a este aumento de la capacidad industrial, la inversión se dispara, como se observa en la figura 1.2.

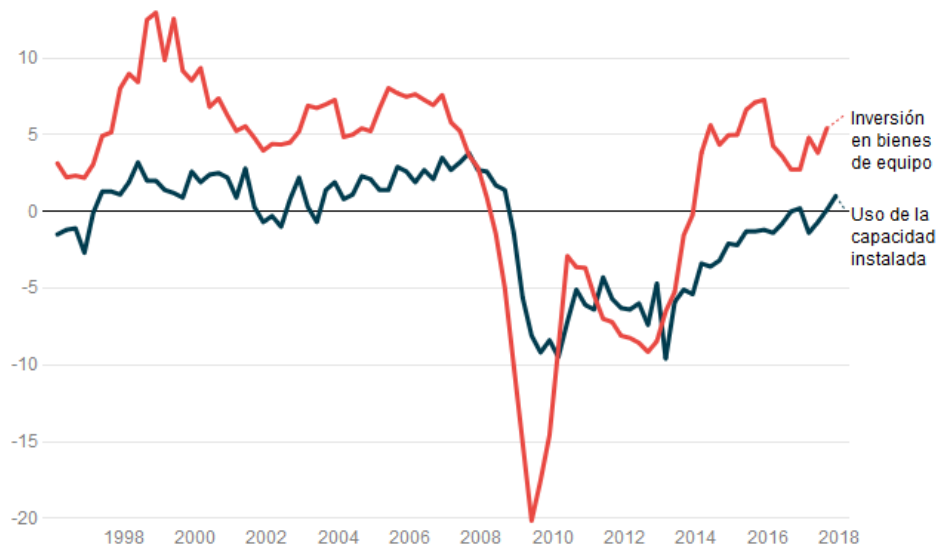


Figura 1.2 – Gráfico de la inversión vs capacidad usada

Fuente: El confidencial – España está al límite de su capacidad industrial

Teniendo estos datos, se puede plantear que es un buen momento de invertir en el sector industrial y poder obtener ventajas competitivas frente a los adversarios en el mercado.

1.2 Objetivos

En este trabajo, se estudiará la viabilidad de implementar el uso de un plato de cuatro garras para torno, que mecaniza piezas de acero, mediante impresión en 3D, más concretamente la fabricación con filamento fundido, FFF; usando ácido poli-láctico, PLA.

Para ello, se desarrolla el diseño del plato, la fabricación del mismo y posteriormente, se estudiarán las fuerzas estáticas que se producen en el útil de amarre para valorar su posible implementación en la industria.

La motivación de desarrollar el siguiente estudio es un intento de abaratar costes en la fabricación de las piezas mecanizadas, ya que si se reduce el coste de un útil empleado en el mecanizado, el PVP de cada pieza que se fabrique en esa máquina-herramienta se verá reducido, obteniendo así una posible ventaja competitiva en el mercado.

1.3 Estructura de la memoria

La estructura de la memoria de este trabajo está compuesta por siete capítulos, que son los siguientes:

- **Capítulo 1:** Introducción y objetivos.

En este apartado, después de una breve introducción del estado actual de la industria española, se explican los objetivos de este proyecto y el desarrollo del mismo, utilizando las herramientas del diagrama de Gantt y Pert. Por último, se desarrolla el estado de la técnica, donde se habla del ámbito de aplicación del trabajo.

- **Capítulo 2:** Diseño del plato.

En este apartado, se explica cómo se ha diseñado el plato mediante diseño asistido por computadora, CAD; explicando las seis partes que lo forman y finalmente, realizando el ensamblaje y vista explosionada del plato de 4 garras.

- **Capítulo 3:** Fabricación usando impresión 3D.

En este apartado, se desarrolla la explicación de las diferentes técnicas y materiales que se emplean en la impresión 3D para, posteriormente, elegir la técnica utilizada y material seleccionado. También se comenta y explica la impresora 3D de la cual se obtiene el total de las piezas que componen el plato.

- **Capítulo 4:** Metodología.

En este apartado, se comentará y explicará la metodología empleada para la realización del análisis de trabajo; desarrollándose un método analítico para obtener las fuerzas necesarias y posteriormente, realizando el modelo de elementos finitos.

- **Capítulo 5:** Resultados obtenidos.

En este apartado, se comentarán los resultados que han sido obtenidos del capítulo anterior y se realizará una valoración de los mismos.

- **Capítulo 6:** Presupuesto

Este apartado se centra el coste total, gastos directos e indirectos, que se ha necesitado para el diseño, fabricación y análisis del plato de 4 garras; también se centra en el costo de venta del producto final.

- **Capítulo 7:** Conclusiones

En este apartado se hablará de las conclusiones resultados del diseño, análisis y prototipado rápido de este proyecto, dando pie al desarrollo de futuros trabajos posibles.

1.4 Recursos empleados

Durante el desarrollo de este proyecto, se han empleado varios recursos que han sido facilitados por diferentes entidades, como la Universidad Carlos III de Madrid y la empresa John Deere Ibérica S.A, o que se han empleado por cuenta propia.

Los cuales han sido:

- Recursos para el diseño del proyecto
 - Software: SOLIDWORKS 2017
- Recursos para el análisis del proyecto
 - Software: ANSYS WORKBENCH 19.1
- Recursos para el prototipado
 - Impresora 3D (Ultimaker 3 Extended)
 - Material de impresión 3D (Ácido poliláctico, PLA)
- Recursos para el desarrollo del proyecto y memoria
 - Ordenador portátil
 - Microsoft Office 2010
 - Documentación técnica especializada en el ámbito de estudio
 - Mano de obra directa

1.5 Cronograma de la realización del trabajo

Para la planificación y organización de este trabajo, se ha planteado el desarrollo del diagrama de Gantt.

1.5.1 Diagrama de Gantt

En el diagrama de Gantt se expone el tiempo de dedicación para diferentes tareas.

En este trabajo se ha dividido en dos partes la realización de las tareas:

- Procesos del trabajo:

En esta tarea se realiza los trabajos de los cuales se obtienen resultados/procesos para la posterior realización de la memoria. El diagrama de Gantt relacionado con este concepto se observa en la figura 1.3.

	PROCESOS DEL TRABAJO												
	abr-18					may-18				jun-18			
	1-abr.	8-abr.	15-abr.	22-abr.	29-abr.	6-may.	13-may.	20-may.	27-may.	3-jun.	10-jun.	17-jun.	24-jun.
Planificación													
Busqueda de información													
Diseño del plato													
Fabricación en impresión 3D													
Cálculos realizados													
	jul-18					ago-18				sep-18			
	1-jul.	8-jul.	15-jul.	22-jul.	29-jul.	5-ago.	12-ago.	19-ago.	26-ago.	2-sep.	9-sep.	16-sep.	23-sep.
Planificación													
Busqueda de información													
Diseño del plato													
Fabricación en impresión 3D													
Cálculos realizados													

Figura 1.3 – Diagrama de Gantt para procesos del trabajo

Fuente: Elaboración propia

- Desarrollo de la memoria:

En esta tarea, una vez se han obtenido los datos, procesos o resultados de la tarea anterior, se realiza el escrito de esta memoria del Trabajo Fin de Grado. La planificación resultante para este desarrollo, se puede ver en la figura 1.4.

	DESARROLLO DE LA MEMORIA												
	abr-18					may-18				jun-18			
	1-abr.	8-abr.	15-abr.	22-abr.	29-abr.	6-may.	13-may.	20-may.	27-may.	3-jun.	10-jun.	17-jun.	24-jun.
Introducción y objetivos													
Diseño del plato													
Fabricación en impresión 3D													
Metodología													
Resultados obtenidos													
Presupuesto													
Conclusiones													
Revisión de la memoria													
	jul-18					ago-18				sep-18			
	1-jul.	8-jul.	15-jul.	22-jul.	29-jul.	5-ago.	12-ago.	19-ago.	26-ago.	2-sep.	9-sep.	16-sep.	23-sep.
Introducción y objetivos													
Diseño del plato													
Fabricación en impresión 3D													
Metodología													
Resultados obtenidos													
Presupuesto													
Conclusiones													
Revisión de la memoria													

Figura 1.4 – Diagrama de Gantt para el desarrollo de la memoria

Fuente: Elaboración propia

1.6 Estado de la técnica

1.6.1 Teoría del mecanizado

Los procesos de mecanizado consisten en obtener la geometría del producto deseado mediante la eliminación de material. Se realiza partiendo de productos como lingotes, tochos o diferentes piezas conformadas mediante forja o moldeo.

1.6.1.1 Tipos de mecanizado

Dependiendo del sistema de clasificación que se utilice, hay varios tipos de mecanizado, que serán tratados a continuación.

- **Según su sistema de fabricación.** [\[2\]](#)

Se pueden dividir en tres sistemas diferentes:

○ **Mecanizados sin arranque de viruta**

Todas las piezas metálicas durante su proceso de fabricación pasan por operaciones de conformado de metales, exceptuando las piezas fundidas. Durante este proceso se realizan moldeados a las piezas para que se conviertan en el producto final requerido sin la necesidad de eliminar material, por lo que, no se produce ningún residuo, conocido como viruta.

○ **Mecanizados con arranque de viruta**

Es el sistema de fabricación más común en la industria debido a la versatilidad que ofrece, en este tipo de mecanizados, se produce una eliminación o arranque del material inicial mediante una herramienta, lo que genera el residuo, llamado viruta. Se puede realizar con una máquina-herramienta, como el torno y la fresadora, o de forma manual, utilizando una sierra o una lima, por ejemplo.

Los mecanizados con arranque de viruta se producen dos procesos distintos. En primer lugar el desbaste, que consiste en la eliminación de gran cantidad de material con poca precisión; y en segundo lugar el acabado, que consiste en eliminar pequeñas cantidades de material pero con una buena precisión.

○ **Mecanizados por abrasión**

El mecanizado por abrasión consiste en la obtención de la pieza deseada mediante un proceso de desgaste llamado abrasión. Para realizarlo, se necesita una herramienta llamada muela abrasiva, que está compuesta por partículas de material abrasivo unidas mediante un aglutinante; esta muela entra en contacto con el material y lo va desgastando desprendiendo pequeñas cantidades de partículas, normalmente incandescentes.

- **Según su categoría de proceso.** [\[3\]](#)

Se pueden dividir en dos categorías:

- **Procesos convencionales**

Durante los procesos convencionales de mecanizado la eliminación de material se produce primordialmente mediante medios mecánicos; los procesos de torneado, taladrado y fresadora son procesos convencionales.

Para su realización de los procesos convencionales, se requiere la intervención de los siguientes elementos: Pieza, herramienta, máquina-herramienta, utillaje y sistema de control. Posteriormente se hará una breve descripción de dichos elementos enfocados en un proceso de torneado.

- **Procesos no convencionales**

Durante los procesos no convencionales de mecanizado la eliminación de material se produce por medios no mecánicos, es decir, procesos eléctricos, físico-químicos,... Ejemplo de estos procesos son la electroerosión y el fresado químico.

1.6.2 Torneado y sistemas de sujeción

Este proyecto está enfocado en el proceso de torneado, que se trata de un proceso convencional con arranque de viruta.

En el proceso de torneado, la máquina-herramienta empleada es el torno. Se trata de un proceso, que trabajando en unas condiciones óptimas, puede obtener un buen acabado superficial. El torno más habitual empleado en la industria, es el llamado torno paralelo, que se puede apreciar en la figura 1.5. [\[3\]](#)

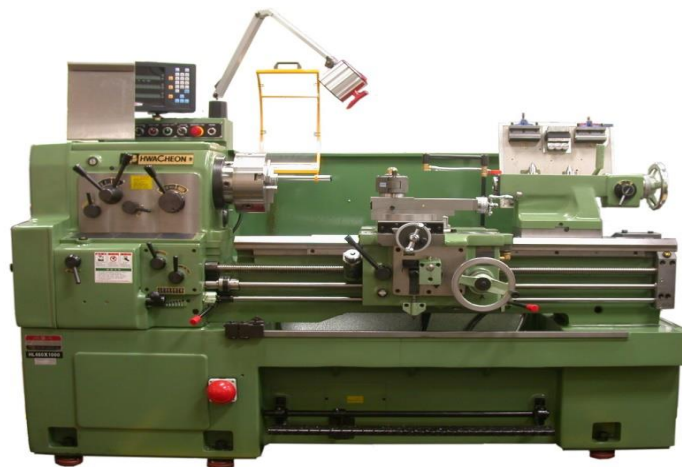


Figura 1.5 – Torno paralelo

Fuente: Wikipedia - Torno

El torno emplea una herramienta monofilo y mediante un movimiento rotacional de la pieza se puede eliminar el material de la pieza inicial. En la figura 1.6 se recoge la operación de torneado exterior.

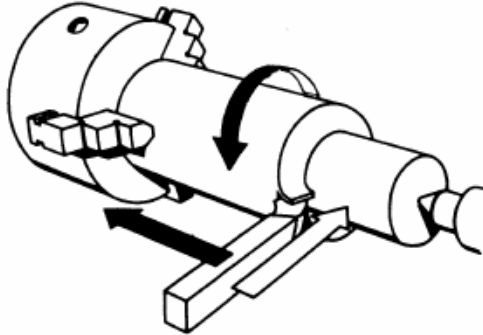


Figura 1.6 – Operación de torneado exterior

Fuente: Procesos de mecanizado – Tecnología mecánica (UC3M)

Un torno paralelo se compone de una cantidad elevada de piezas, que se pueden agrupar en las siguientes partes principales: [4]

- **Bancada**

La bancada, al igual que en el resto de máquinas-herramientas, es la pieza que sirve de apoyo para el resto de partes del torno. Debe ser una estructura rígida que sea capaz de absorber los esfuerzos y vibraciones generadas en el mecanizado.

En su parte superior se encuentran las guías sobre las que deslizan el cabezal móvil y el carro portaherramientas; por este motivo, las guías son de gran importancia para obtener la precisión y el rendimiento óptimo del torno.

- **Cabezal fijo**

En el cabezal fijo se encuentra el husillo que comunica a la pieza el movimiento de rotación. Generalmente está compuesto, generalmente, por las siguientes partes:

- **Caja:** Es de armazón rígido, unido a la bancada mediante tornillos; en ella se apoya el husillo a través de una serie de rodamientos.
- **Husillo o eje principal:** Es el componente del torno que está sometido a más esfuerzos, ya sean axiales como de torsión. El husillo suele ser hueco, en su extremo delantero, conocido como cabeza del husillo, lleva

un cono Morse, y en el exterior de este extremo, de forma concéntrica se encuentra un sistema de sujeción del plato.

- **Rodamientos:** Son empleados para que el husillo gire con el mínimo rozamiento posible, evitando vibraciones y sin permitir juego. Los rodamientos más empleados son de rodillos cónicos o cilíndricos.
- **Sistema de accionamiento:** Es el sistema que se encarga de transmitir movimiento de giro al husillo. En él se distinguen dos partes muy diferenciadas: la caja de velocidades y el motor.

- **Carro portaherramientas**

El carro portaherramientas es el encargado de sujetar la herramienta y proporcionarlos movimientos de avance y penetración.

En el caso del torno paralelo, se trata de un sistema de carro cruzado, que está compuesto por:

- **Carro principal:** Se desliza por las guías de la bancada
- **Carro transversal:** Se desplaza sobre el carro principal según la dirección normal al eje de rotación del torno.
- **Torreta de herramientas:** Apoyado sobre el carro transversal en una plataforma giratoria. Se suele encontrar un eje sobre el que gira la torreta cuadrada y se pueden fijar cuatro herramientas la vez.

- **Contrapunto o cabezal móvil**

El contrapunto es un sistema de sujeción empleado para mecanizar piezas largas; sin embargo, es uno de los componentes principales del torno, ya que se encuentra presente en todos ellos, y además se utiliza en las operaciones de taladrado, roscado y escariado, ya que sobre él se coloca la herramienta correspondiente.

- **Sistemas auxiliares**

Destacan cuatro sistemas auxiliares del torno:

- **Sistema de refrigeración:** Está compuesto por un depósito de fluido de corte, la bomba y conductos necesarios para dirigir el flujo. Es un

sistema necesario ya que se alcanzan elevadas temperaturas en las operaciones de torneado.

- Sistema de engrase: Es necesario para lubricar la máquina para su correcto funcionamiento
- Elementos de seguridad: Tales como pantallas protectoras o carenados.
- Sistema eléctrico: Realiza el accionamiento de la máquina

- **Sistemas de sujeción**

Los sistemas de sujeción de las piezas en el proceso de torneado deben cumplir dos objetivos primordiales:

- Amarrar la pieza correctamente para que no se mueva mientras se está mecanizando.
- Transmitir el movimiento giratorio de corte desde la máquina.

El funcionamiento de los sistemas de sujeción se basa en la fuerza de rozamiento que se generan al apretar la pieza contra las superficies de sujeción; esto evitará que se la fuerza de corte mueva la pieza mientras se realiza el mecanizado.

Para seleccionar el sistema de sujeción adecuado, se debe saber la forma de la pieza que se va a tornear y la operación que se va a realizar.

Los sistemas de sujeción más utilizados son:

- Platos centradores de garras.
- Montaje entre puntos
- Lunetas fijas y móviles
- Pinzas o boquillas expansibles

Aunque exista una amplia gama de útiles de sujeción para torneado, este trabajo se centrará en los platos centradores de garras.

Para la sujeción de piezas de pequeña longitud, habitualmente se utilizan platos centradores con dos, tres o cuatro garras, que están unidos al husillo, normalmente mediante roscado. Con estos útiles, se permite realizar tanto torneado exterior como interior.

Dependiendo de la geometría de la barra de materia prima inicial, se puede utilizar un tipo de plato u otro, por ejemplo, si la barra tiene una forma que no sea de revolución, lo recomendable es utilizar un plato de cuatro garras, aunque también sería válido de dos garras; por ejemplo, si la pieza es circular, se recomienda uno de tres o cuatro garras, dependiendo de las fuerzas que se requieran.

El plato de tres garras, también llamado plato universal, se aprieta las garras simultáneamente, de esta forma, la pieza se centra automáticamente; mientras que el plato de cuatro garras, el accionamiento es independiente, lo que implica que la pieza no se centra automáticamente y se debe centrar debidamente antes de comenzar el mecanizado.

En cualquiera de los platos de garras, es necesario intercalar un material más blando entre las garras y la pieza con el objetivo de no dañarlas.

En las figuras 1.7 se puede apreciar un plato de tres garras y otro de cuatro garras, respectivamente.



Figura 1.7 – Plato de tres y cuatro garras

Fuente: Manomano

Finalmente, en la figura 1.8 se puede ver la disposición de cada componente montado en un torno paralelo.



Figura 1.8 – Componentes del torno paralelo

Fuente: Indumetan – Partes del torno: Elementos principales del torno paralelo

En el proceso de torneado se pueden realizar diferentes operaciones, como son las siguientes: [4]

- **Refrentado**

En el refrentado se mecaniza el extremo de la pieza mediante planos perpendiculares al eje del husillo, moviendo la herramienta con el carro transversal.

- **Cilindrado**

El cilindrado se trata de una operación con la que se obtienen superficies cilíndricas o se reduce el diámetro de la pieza que se esté trabajando.

- **Torneado excéntrico**

El torneado excéntrico es un caso particular de cilindrado mediante el cual se obtienen cilindros de distintos ejes de giro en una misma pieza.

- **Torneado cónico**

Con esta el torneado cónico se genera una pieza con forma de cono, para ello se pueden conseguir de diferentes maneras, como puede ser inclinar el carro portaherramientas.

- **Torneado de formas o copiado**

Mediante el torneado de formas se pueden conseguir curvas en las piezas torneados.

- **Roscado**

En el torno se pueden conseguir roscas para tuercas o tornillos

- **Tronzado y ranurado**

El tronzado es la operación mediante la cual se corta la pieza ya mecanizada de la barra de materia prima.

El ranurado es un proceso similar, sin embargo, no corta la pieza en su totalidad. Cabe destacar el ranurado radial, frontal y oblicuo.

- **Moleteado**

La finalidad del moleteado es crear una superficie rugosa en la pieza, para ello se utilizan unas ruedas estriadas de acero, llamadas moletas.

- **Taladrado y escariado**

La operación de taladrado se puede llevar a cabo en el torno girando la pieza y desplazando la herramienta que no gira. La herramienta, ya sea broca o escariador, está colocada en el contrapunto. El escariado es una operación complementaria, mediante la cual se obtienen agujeros de precisión dimensional y buen acabado superficial.

Capítulo 2

Diseño del plato

2.1 Diseño en Solidworks 2017

Para la realización del diseño del plato de cuatro garras independientes manual, se ha utilizado el software de diseño CAD en 3D: **Solidworks 2017**.

Se tienen que realizar los diseños de las siguientes partes del plato de 4 garras manuales:

- **Cuerpo del plato:**

Las dimensiones han sido obtenidas del catálogo online la empresa SMW® AUTOBLOCK, más concretamente del plato: SMW tipo SGS-SGSF. El cual puede ser de 3 o 4 garras, y además tiene una gran variedad de dimensiones, de las cuales, se han obtenido las 3 dimensiones principales del plato que podemos ver en la tabla 2.1.

Partes	Dimensiones
Diámetro exterior	160 mm
Diámetro interior	42 mm
Altura	59.5 mm

Tabla 2.1 – Dimensiones del cuerpo del plato

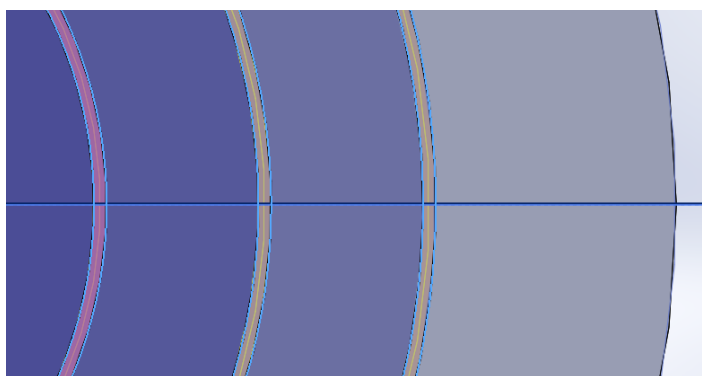
Fuente: Elaboración propia

Una vez se han obtenido las 3 dimensiones principales del cuerpo del plato, se empieza con el diseño en Solidworks 2017.

- **Fases de diseño:**

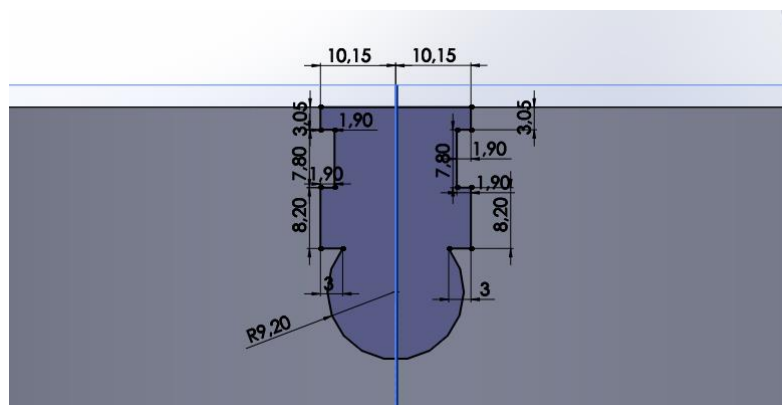
1. Se realiza un boceto sobre la planta, con el eje de coordenadas como punto central, de una circunferencia de 160mm de diámetro; posteriormente se realiza

2. Se realiza un boceto de una circunferencia de 42mm de diámetro sobre la cara superior de la pieza anteriormente extruida, y se realiza un vaciado a lo largo de toda la longitud anteriormente aplicada.
3. Sobre la cara superior de la pieza extruida al inicio, se realiza un boceto con 6 circunferencias, teniendo como centro el eje de coordenadas, a las siguientes cotas: 34mm, 35mm, 47mm, 48mm, 60mm y 61mm. Una vez se ha realizado el boceto, se realiza un vaciado con una profundidad de 1mm y un ángulo de 45° de las superficies que se aprecian en la figura 2.1.



Fuente: Elaboración propia

4. Se crea un plano de referencia nuevo (plano 1), paralelo al alzado y a una distancia de 82mm.
5. Sobre el plano 1 se realiza un boceto que se observa en la figura 2.2, se corresponderá con la vía de la garra.



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el croquis, se realiza un vaciado sobre todo la pieza

6. Como el plato que se quiere realizar es de 4 garras; se realiza una simetría de la vía de la garra, será equidistante en 360° y con un total de 4 repeticiones.
7. Sobre la parte inferior de la pieza (la correspondiente a la planta), se realiza un boceto de 19.1mm de diámetro, con centro en el eje central de cada vía y a una distancia de 49.5mm sobre el eje de coordenadas. Se corresponderá con el espacio necesario para ensamblar el soporte que sujeta el tornillo que mueve cada vía.
8. Como se tienen 4 vías, se vuelve a realizar una simetría como la realizada en el punto 6.
9. Se realiza un boceto sobre la parte inferior de la pieza, de una circunferencia de 44mm de diámetro con centro en el eje de coordenadas y se realiza un vaciado de 10mm.
10. A continuación, se harán los redondeos y chaflanes correspondientes:
 - Redondeo de 2mm por la parte externa del plato.
 - Chaflán de 1mm y 45° sobre la parte inferior del vaciado de diámetro de 44mm.
 - Redondeo de 0.5mm entre la diferencia de diámetros de 44mm y 42mm.
11. Se realiza el boceto, que se corresponde con el de la figura 2.3, sobre la parte inferior del plato:

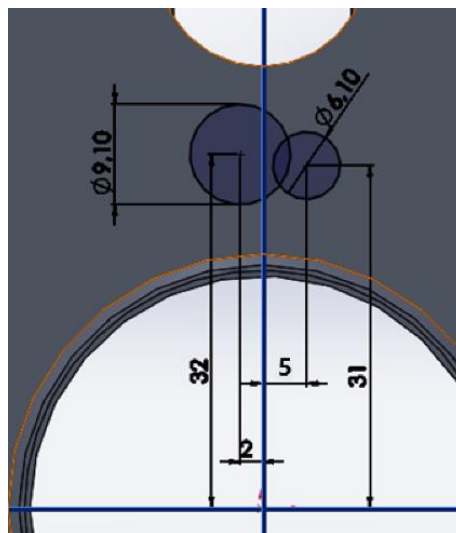


Figura 2.3 – Boceto para vaciado tuercas en el cuerpo del plato

Fuente: Elaboración propia

Se hacen dos vaciados:

- Sobre la circunferencia de 9.1mm de diámetro se realiza un vaciado de 6mm de profundidad.
 - Sobre la circunferencia de 6.1mm de diámetro se realiza un vaciado de 4mm de profundidad.
12. Se realiza sobre la superficie interna del vaciado de 9.1mm un boceto con otra circunferencia de 6.1mm de diámetro y, posteriormente, se realiza un vaciado de 6mm de profundidad.
 13. Se realiza sobre la superficie interna del vaciado de 6.1mm un boceto con otra circunferencia de 3.6mm de diámetro y, posteriormente, se realiza un vaciado de 7mm de profundidad.
 14. Se realiza una simetría de los vaciados creados en los puntos 11,12 y 13. La simetría será equidistante en 360° y se realizarán un total de 3 simetrías.
 15. Se hacen los redondeos por los vaciados anteriores de 0.25mm.
 16. Para terminar, se realiza el roscado de los 6 vaciados realizado anteriormente (puntos 12 y 13); para ello se utiliza el creador de roscas que tiene incorporado Solidworks 2017, se realiza extruyendo la rosca por toda la superficie y con una métrica tipo “Metric Die: M2x0.4”

Finalmente, el plato diseñado en Solidworks 2017 se puede observar en la figura 2.4.

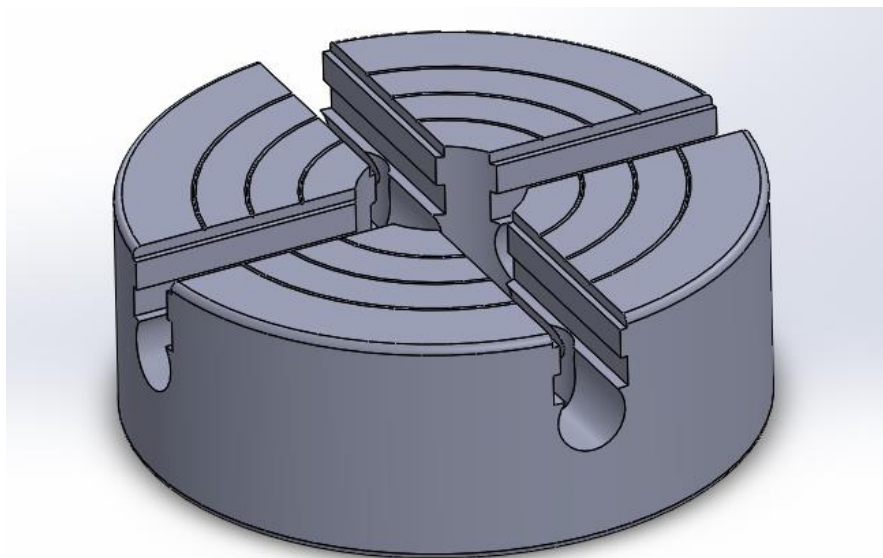


Figura 2.4 – Cuerpo del plato

Fuente: Elaboración propia

- **Garra:**

Las dimensiones de las garras se calculan en función de las dimensiones del plato, y se han obtenido las dimensiones principales que se observan en la tabla 2.2.

Partes	Dimensiones
Largo	70 mm
Ancho	20 mm
Altura	53 mm

Tabla 2.2 – Dimensiones de la garra

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas las dimensiones principales de la garra, se comienza con el diseño en Solidworks 2017 de la garra.

- **Fases de diseño:**

1. Se realiza un boceto en la planta, se trata de un rectángulo de ancho 20mm y de largo 70mm. A continuación, se hace una extrusión con una altura de 53mm, que será la altura máxima de la garra.
2. En la parte superior de la pieza anteriormente extruida se realiza el boceto, que se ve en la figura 2.5, en una de las esquinas.

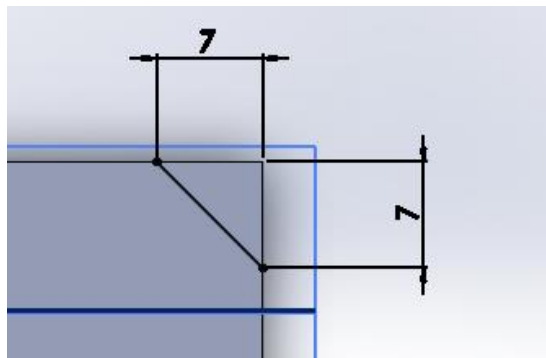


Figura 2.5 – Boceto esquina garra

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el boceto, se realiza un vaciado a lo largo de toda la pieza.

3. Se realiza simetría para hacer 4 vaciados en total, uno en cada esquina.
4. Sobre la superficie superior, se realiza el boceto observado en la figura 2.6.

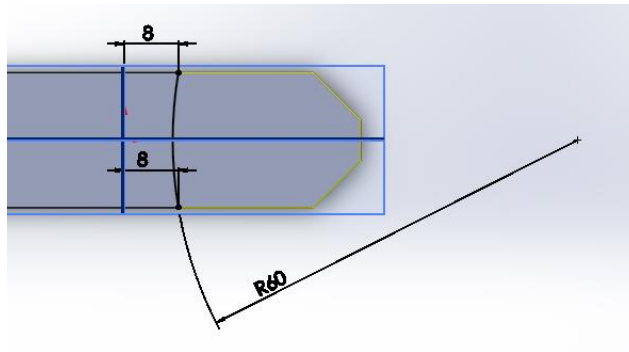


Figura 2.6 – Boceto amarre cilíndrico en la garra

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realiza un vaciado con una profundidad de 20mm.

5. Sobre la superficie superior, se realiza el boceto que se observa en la figura 2.7.

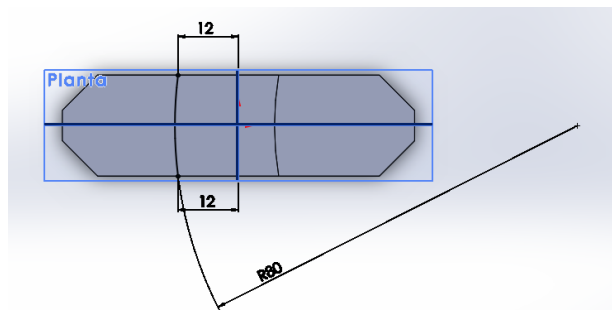


Figura 2.7 – Boceto amarre cilíndrico 2 en la garra

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realiza un vaciado con una profundidad de 10mm.

6. Se realiza un boceto en el alzado, sobre un lateral de la garra, a 8mm de altura y una incisión de 2mm; posteriormente se vacía a lo largo de toda la garra.
7. Se debe realizar simetría para tener el otro lateral de la garra igual.
8. Se realiza el boceto, que se ve en la figura 2.8, en la planta:

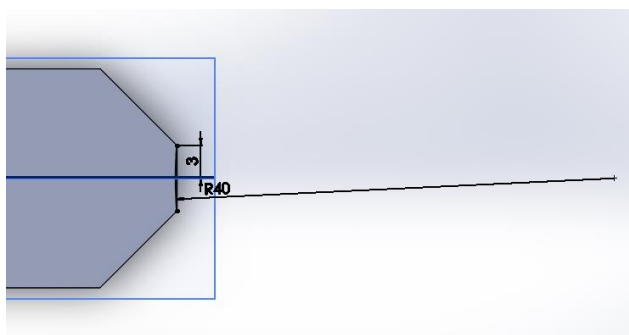


Figura 2.8 – Boceto extremo garra

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se hace un vaciado por toda la altura de la garra.

9. Se realiza el mismo boceto anterior pero en el otro extremo, y se hace el vaciado también por toda la altura de la garra.
10. Se crea un plano nuevo, plano 1, paralelo al alzado a 35mm de distancia del eje de coordenadas.
11. Se realiza el boceto observado en la figura 2.9, en el plano 1:

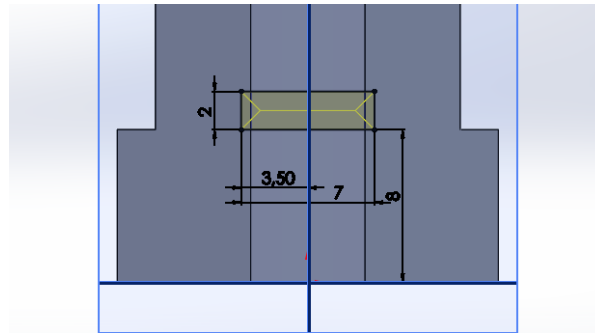


Figura 2.9 – Boceto de incisiones en la garra

Fuente: Elaboración propia

Ahora se realiza un vaciado de 3.5mm de profundidad y un ángulo de 30°.

12. Se realiza simetría del vaciado anterior, para tenerlo en el otro extremo.
13. Se hace una matriz lineal, con una distancia de 5mm y un total de 5 incisiones en la cara de menor altura y de 9 incisiones en la cara de mayor altura.
14. Se realiza el chaflán por la superficie superior de la garra, con una profundidad de 0.75mm y un ángulo de 50°.
15. Se crea un plano nuevo, plano 2, paralelo al alzado a una distancia de 40mm del eje de coordenadas.
16. Se realiza sobre el plano 2 el boceto que se observa en la figura 2.10.

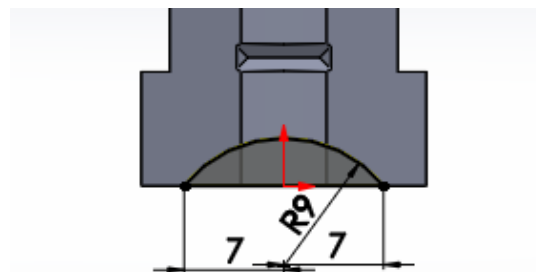


Figura 2.10 – Boceto vaciado para rosca en la garra

Fuente: Elaboración propia

A continuación se hace un vaciado a lo largo de la longitud total de la garra.

17. Se procede a hacer la extrusión de la rosca, con el creador de roscas que viene incorporado en Solidworks 2017, a lo largo del vaciado anterior de métrica tipo “Metric Die: M18x2.0”, y el resultado se observa en la figura 2.11.

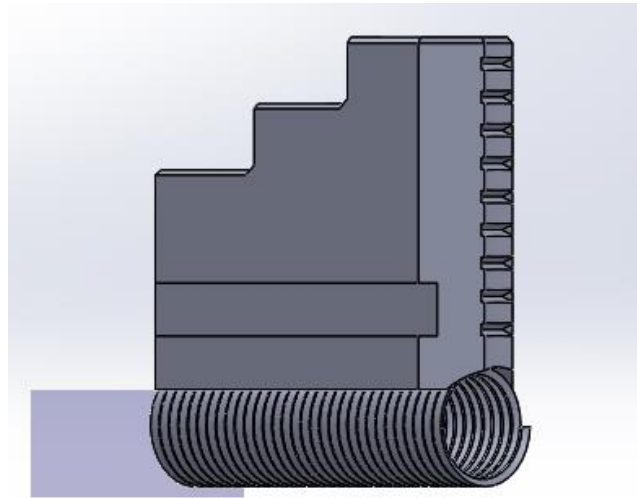


Figura 2.11 – Garra con la extrusión de la rosca

Fuente: Elaboración propia

18. Para terminar, se realiza un boceto en el alzado para quitar el sobrante de la rosca creada y se hace el vaciado en ambos sentidos.

Cabe destacar que aunque sean 4 garras las que hay en el plato, solo se diseña una, ya que son idénticas todas.

Finalmente, la garra diseñada en Solidworks 2017 se aprecia en la figura 2.12.

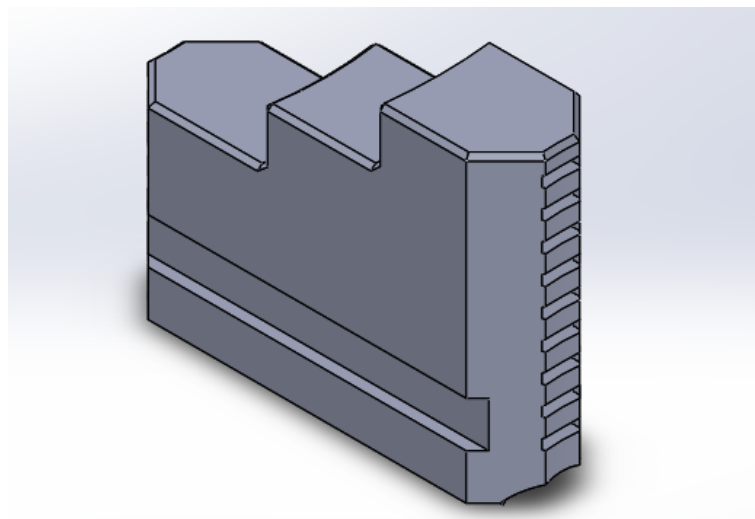


Figura 2.12 – Garra

Fuente: Elaboración propia

- **Tornillo movedor de la garra:**

Las dimensiones de este tornillo vienen definidas por la garra y el cuerpo del plato.

• **Fases de diseño:**

1. Se realiza sobre el alzado el boceto de una circunferencia de 17.8mm de diámetro, con centro en el eje de coordenadas y, a continuación, se realiza una extrusión de 58.5mm de longitud.
2. Se realiza sobre una de las superficies laterales del tubo macizo creado anteriormente, un boceto con forma hexagonal de 5mm de lado; se hará de esta manera para poder utilizar una llave ALLEN. Posteriormente, se realiza un vaciado de 5mm de profundidad.
3. Se realiza un plano, plano 1, paralelo al alzado a 29.25mm del eje de referencia.
4. En el plano 1, se realiza un boceto circular de 14.75mm de diámetro, con centro en el eje de coordenadas y se realiza un vaciado por dos direcciones, en la dirección 1 se vacía 4.5mm, mientras que en la dirección 2 se vacía 6.25mm. Este eje será por el cual sea sujetado el tornillo.
5. Para terminar, se realiza el roscado, para ello se utiliza el creador de roscas que tiene incorporado Solidworks 2017, se realiza la rosca por toda la superficie externa y con una métrica tipo “Metric Die: M18x2.0”

Finalmente, el tornillo movedor de la garra diseñado en Solidworks 2017 se observa en la figura 2.13.

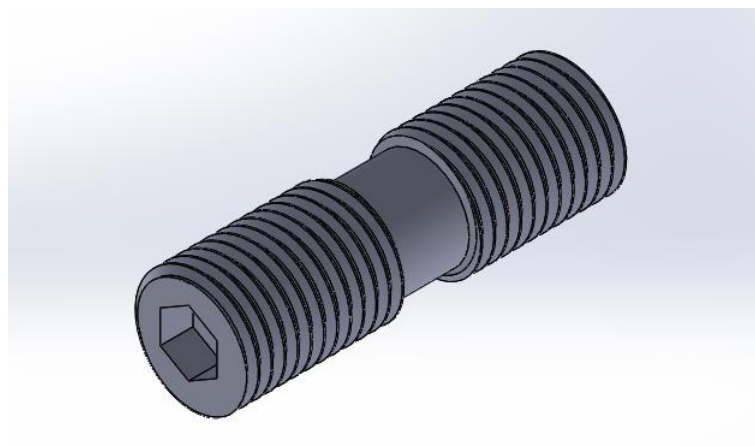


Figura 2.13 – Tornillo movedor de la garra

Fuente: Elaboración propia

- **Sujeción tornillo movedor garra:**

Las dimensiones de este soporte vienen definidos por dos elementos: el cuerpo del plato y el tornillo que mueve la garra.

• **Fases de diseño:**

1. Se realiza en la planta un boceto de 19mm de diámetro, con centro en el eje de coordenadas y se realiza una extrusión de 40.45mm de altura.
2. En la superficie superior, se realiza el boceto que se observa en la figura 2.14.

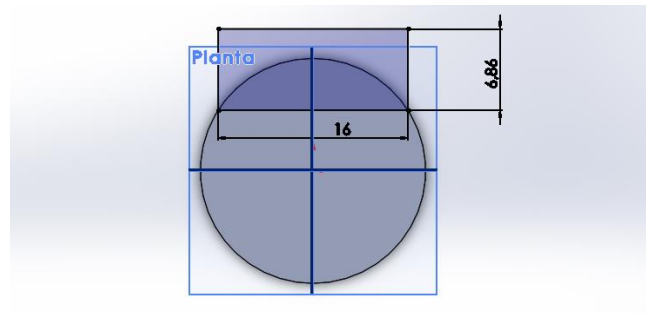


Figura 2.14 – Boceto superficie superior en la sujeción del tornillo

Fuente: Elaboración propia

Se realiza un vaciado de 15mm de profundidad.

3. Se realiza simetría del vaciado anterior con respecto al alzado.
4. En la superficie que queda del vaciado del paso 2, se realiza el boceto que se aprecia en la figura 2.15.

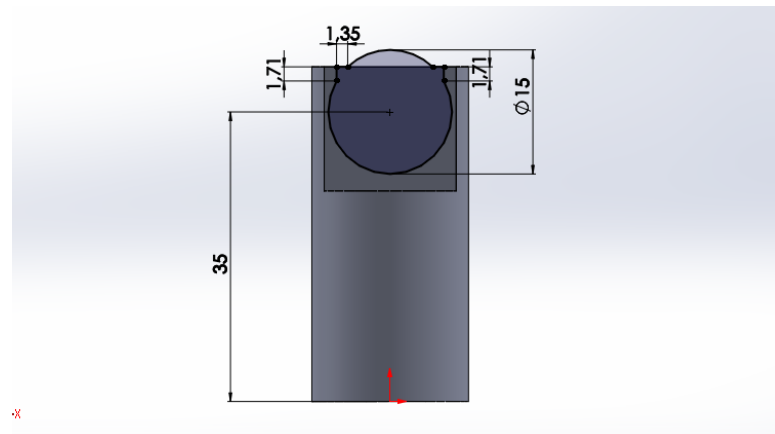


Figura 2.15 – Boceto para vaciado en la sujeción del tornillo

Fuente: Elaboración propia

Se realiza el vaciado por toda la superficie. Este será el espacio para sujetar el tornillo que mueve la garra.

Finalmente, el soporte de sujeción diseñado en Solidworks 2017 se ve en la figura 2.16.

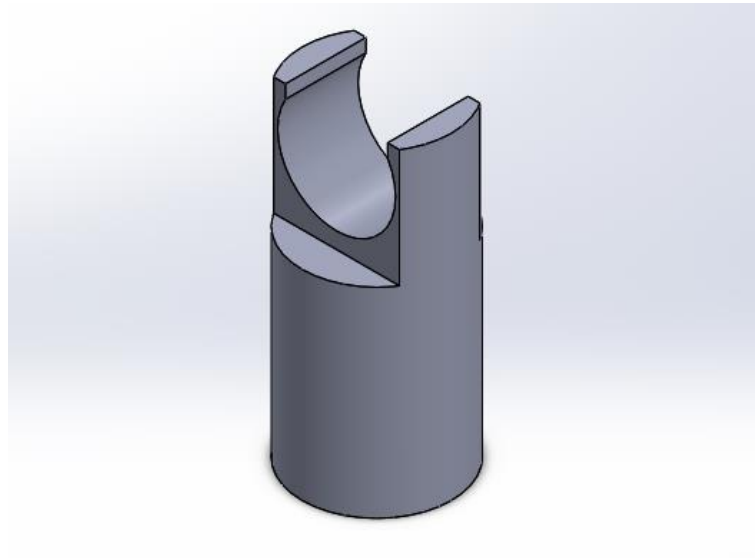


Figura 2.16 – Sujeción del tornillo

Fuente: Elaboración propia

- **Tornillo inferior largo:**

Esta pieza está localizada en el vaciado de 9.1mm que se ha realizado en la superficie inferior del cuerpo del plato, por lo que sus dimensiones están definidas anteriormente.

• **Fases de diseño:**

1. Se realiza el boceto, observado en la figura 2.17, sobre el alzado:

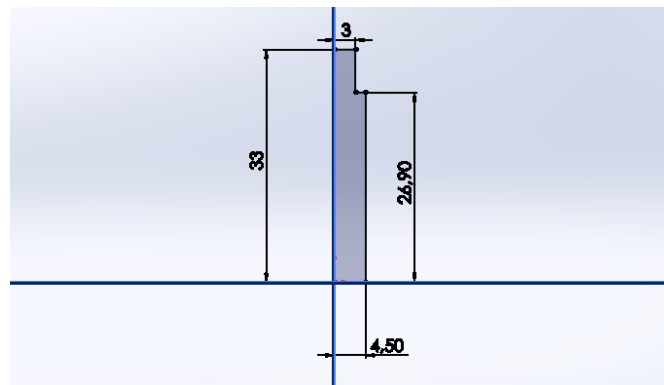


Figura 2.17 – Boceto cuerpo tornillo inferior largo

Fuente: Elaboración propia

La manera más sencilla de realizar esta pieza es diseñarla por revolución, para ello se crea un eje vertical de revolución sobre el eje de coordenadas.

2. Se realiza por el extremo de 9mm de diámetro un chaflán de 0.5mm y un ángulo de 30°.
3. Se crea un plano, plano 1, paralelo al alzado a una distancia de 5mm.
4. Sobre el plano 1 se realiza el boceto que se observa en la figura 2.18.

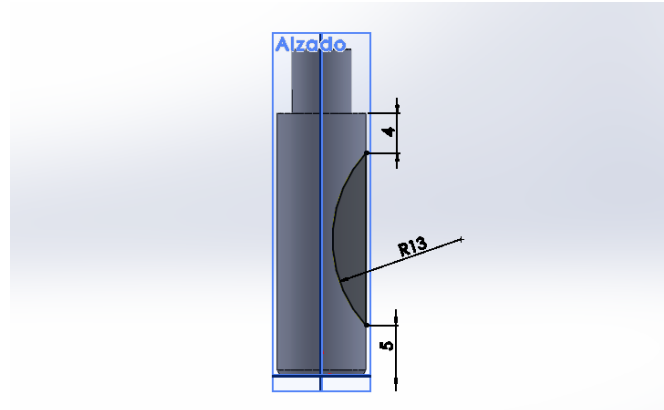


Figura 2.18 – Boceto sobre plano 1 del tornillo inferior largo

Fuente: Elaboración propia

Se hace un vaciado sobre el ancho de la pieza.

5. Se realiza un plano, plano 2, paralelo a la planta a una distancia de 33mm.
6. Sobre el plano 2, se realiza el boceto que se aprecia en la figura 2.19.

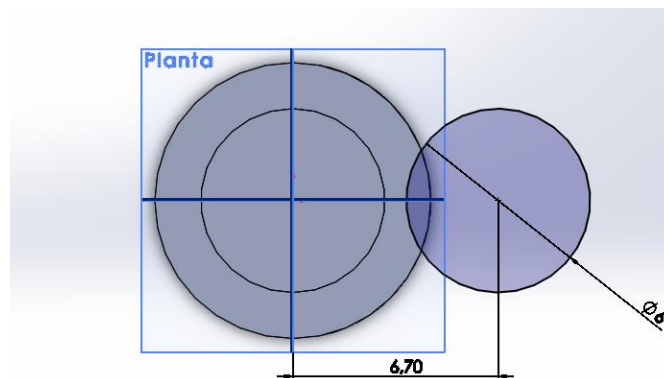


Figura 2.19 – Boceto sobre plano 2 en el tornillo inferior largo

Fuente: Elaboración propia

Se hace un vaciado de 20mm de longitud.

7. Se realiza un redondeo de 0.25mm en la diferencia de diámetros.
8. Se realiza la rosca, con el creador de roscas que viene incorporado en Solidworks 2017, en el diámetro de 6mm a lo largo de la superficie y de métrica tipo “Metric Die: M2x0.4”

Finalmente, el tornillo diseñado en Solidworks 2017 es el apreciado en la figura 2.20.

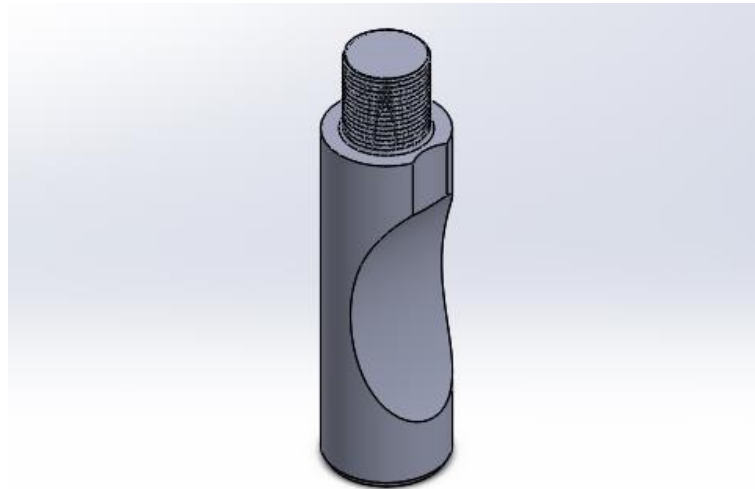


Figura 2.20 – Tornillo inferior largo

Fuente: Elaboración propia

- **Tornillo inferior pequeño:**

Esta pieza está localizada en el vaciado de 6.1mm que se ha realizado en la superficie inferior del cuerpo del plato, por lo que sus dimensiones están definidas anteriormente.

• **Fases de diseño:**

1. Se realiza un boceto sobre la planta, con el eje de coordenadas como punto central, de una circunferencia de 6mm de diámetro; posteriormente se realiza una extrusión con una longitud de 3.75mm de longitud; esto se corresponde con la cabeza del tornillo
2. En la cara superior de la extrusión anterior se realiza un boceto de una circunferencia de 3.5mm de diámetro, concéntrica con la anterior, y realiza una extrusión de 7.1mm, esto será el alma del tornillo.
3. En la cara inferior de la extrusión realizada en el paso 1, se realiza el boceto que se puede ver en la figura 2.21.

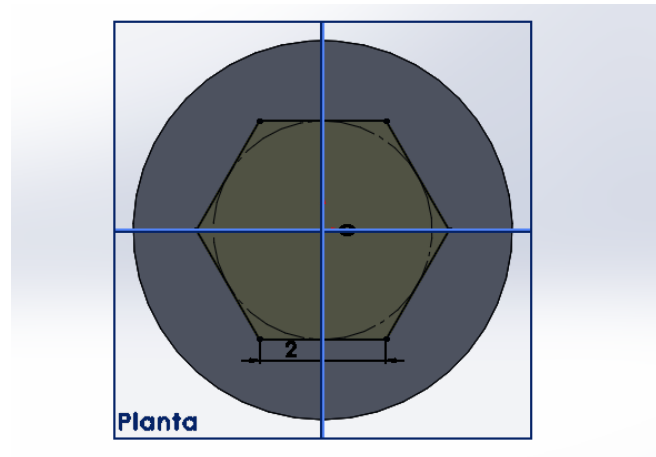


Figura 2.21 – Boceto para vaciado llave ALLEN

Fuente: Elaboración propia

A continuación se realiza un vaciado de 1.5mm de profundidad.

4. En la cara del vaciado anterior, se realiza una circunferencia tangente al hexágono y se hace un vaciado con una profundidad de 1mm y un ángulo de 65°.
5. Se realiza en la diferencia de diámetros, 6.1mm y 3.5mm, un redondeo de radio 0.25mm
6. En la cabeza del tornillo se realiza un chaflán de 0.25mm y 30°.
7. Se realiza la rosca, con el creador de roscas que viene incorporado en Solidworks 2017, en el diámetro de 6mm a lo largo de la superficie y de métrica tipo “Metric Die: M2x0.4”

Finalmente, el tornillo diseñado en Solidworks 2017 se puede apreciar en la figura 2.22.

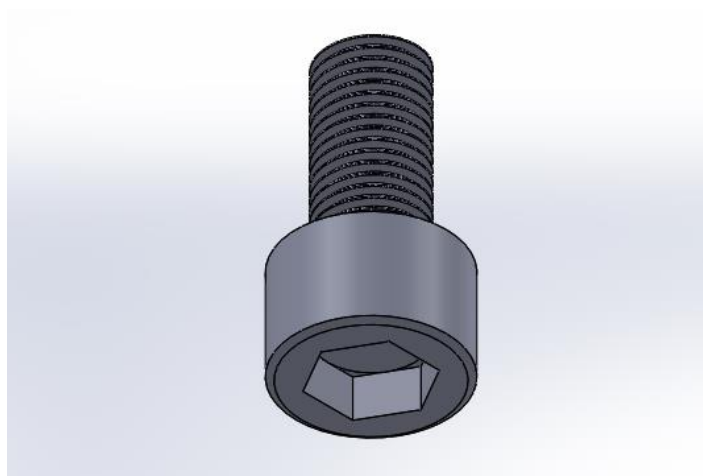


Figura 2.22 – Tornillo inferior pequeño

Fuente: Elaboración propia

2.2 Ensamblaje en Solidworks 2017

Una vez están diseñadas todas las piezas que componen el plato, se procede a realizar el ensamblaje del plato de garras.

Para realizar el ensamblaje del plato, se necesitan las siguientes piezas:

- 1 Cuerpo del plato
- 4 Garras
- 4 Tornillos movedores de la garra
- 4 Sujeción de tornillo movedor de la garra
- 3 Tornillos inferiores largos
- 3 Tornillos inferiores pequeños

El resultado del ensamblaje del plato se observa en la figura 2.23.

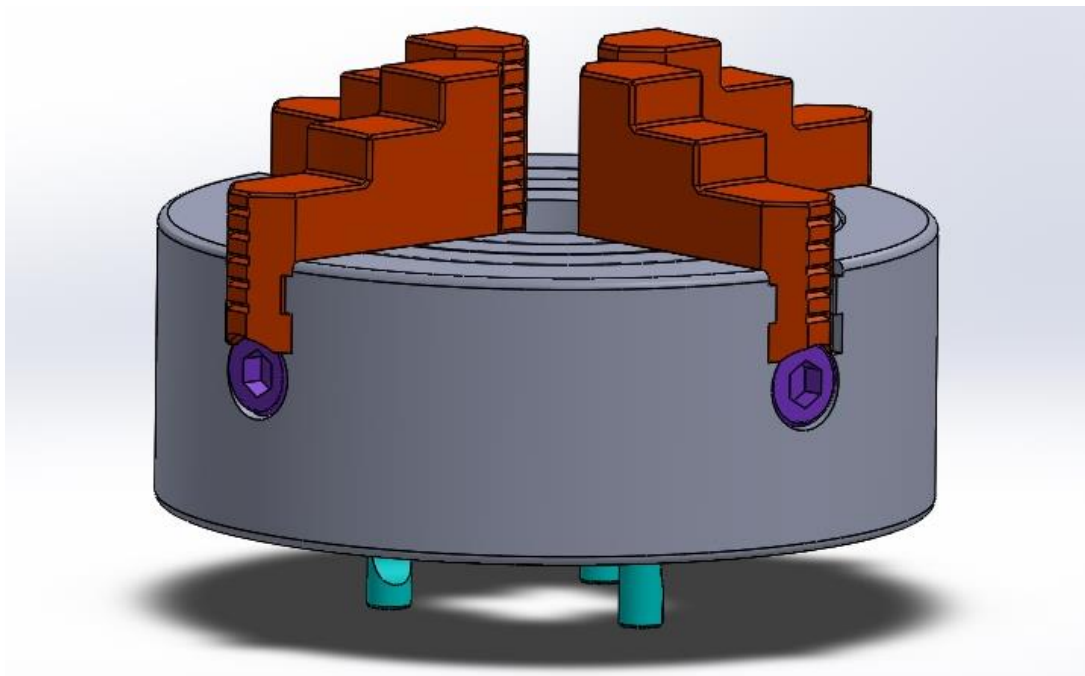


Figura 2.23 – Ensamblaje total en Solidworks 2017

Fuente: Elaboración propia

Para ver mejor la disposición de los elementos dentro del plato, se ha realizado también un ensamblaje pero sin visualizar el cuerpo del plato, obteniendo como resultado el que se puede ver en la figura 2.24.

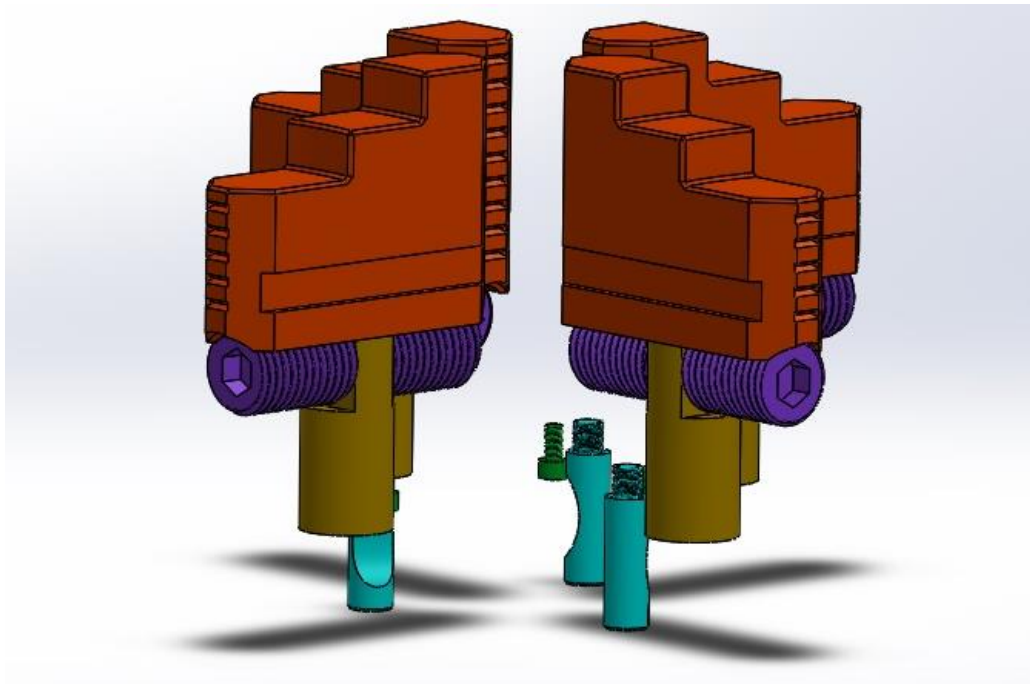


Figura 2.24 – Ensamblaje sin plato en Solidworks 2017

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se podrá observar, en la figura 2.25, una vista explosionada del plato.

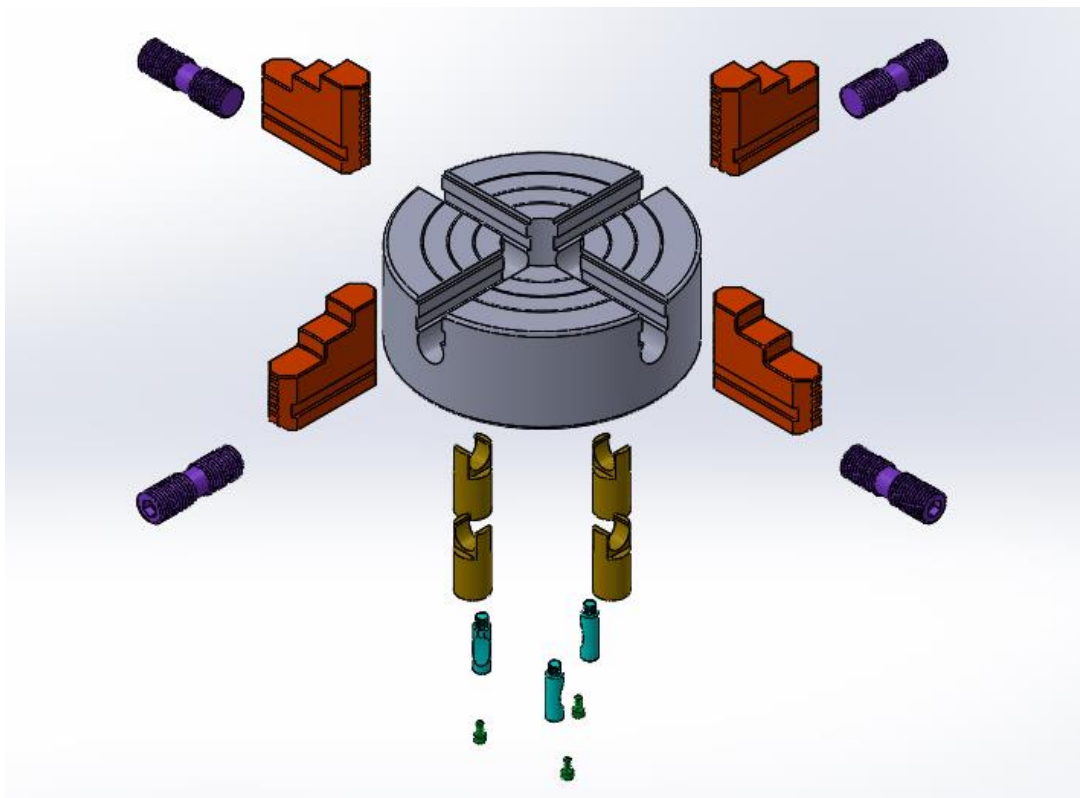


Figura 2.25 – Vista explosionada

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3

Fabricación usando impresión 3D

3.1 Técnicas de impresión 3D

A día de hoy, existen diversas técnicas de impresión 3D, cada una con sus ventajas y desventajas, por lo que para elegir que técnica se quiere usar, se tiene que hacer una valoración de las mismas.

Las principales técnicas de impresión se dividen en dos tipos de tecnología: deposición de material y con láser.

- **Tecnologías de deposición de material:**

Esta técnica se trata de una técnica aditiva, donde se deposita el material en capas para crear la pieza final.

La tecnología usada es el modelado de deposición fundida (FDM, *Fusion Deposition Modeling*), fue desarrollada por Scott Crump a finales de 1980 y comenzó a comercializar en 1990. El término asociado a esta tecnología, y sus siglas, son marcas registradas de *Stratasys Inc.* Debido a esta razón, se comenzó a utilizar un término equivalente: Fabricación con filamento fundido (FFF, *Fused Filament Fabrication*), por este motivo, a lo largo de este trabajo se hablará de éste último término.

- **Fabricación con filamento fundido, FFF. [\[5\]](#)**

Como se nombró anteriormente, se trata de una fabricación por adición de materiales termoplásticos; es decir, se deposita el material en capas para conformar la pieza. La finalidad de esta tecnología es fabricar capa por capa piezas resistentes, duraderas y con unos parámetros dimensionales precisos a partir de filamentos plásticos o metálicos que inicialmente se encuentran almacenados en rollos.

Las fases del proceso de fabricación con filamento fundido son, por lo general, las siguientes:

- Procesado previo: Una vez está finalizado el archivo CAD 3D, se debe introducir en un software de impresión, generalmente se debe guardar el archivo CAD 3D con una extensión de formato “.STL”, que irá laminando y calculando la trayectoria con la que se depositará el material.
- Producción: Se coloca el rollo de filamento en el soporte que viene incorporado en la impresora 3D adecuada para la FFF, se impulsa el filamento por unos rodillos o elementos de guiado que llevan hasta el extrusor que calienta el material hasta la temperatura de fusión, entonces el material se encuentra en un estado semilíquido y comienza a fluir por la boquilla que se encuentra en el extrusor, para así, depositar el material semilíquido en la cama a lo largo de la trayectoria de extrusión, en los ejes X,Y,Z, anteriormente calculada por el software. En algunos casos, se debe realizar una capa base donde se comenzará a desarrollar la pieza y así no tener problemas al separar la pieza de la cama de la impresora.

En la figura 3.1, se puede apreciar un esquema del funcionamiento de la FFF, con sus correspondientes componentes.

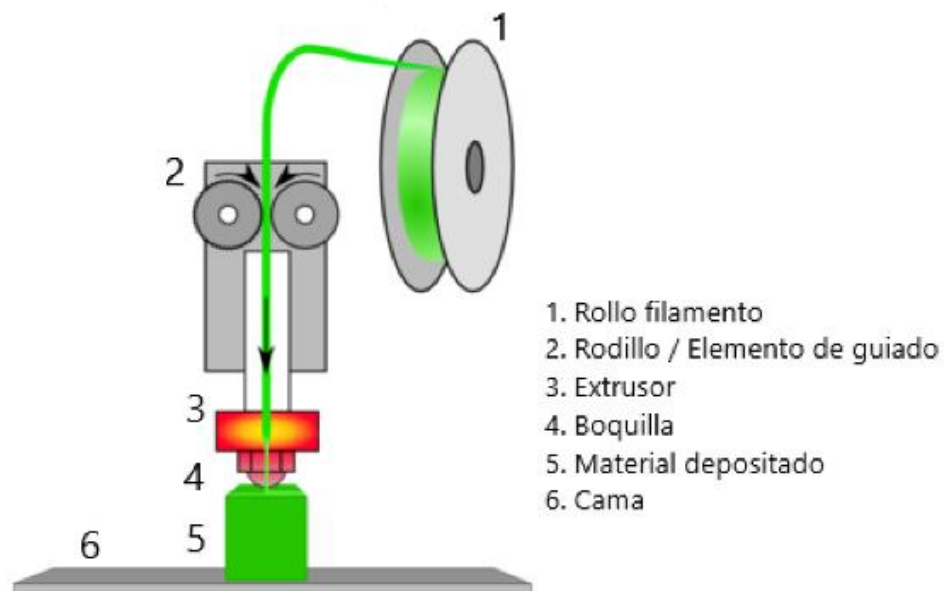


Figura 3.1 – Funcionamiento de la FFF

Fuente: Elaboración propia

- **Post-procesado:** Para finalizar la fabricación, se debe retirar la pieza de la impresión, separar la capa base o material de soporte fabricado; y la pieza ya estaría lista para utilizarse.

Las ventajas principales de esta técnica son varias:

- Bajo coste.
- Tecnología rápida para confeccionar prototipos.
- Fácil de utilizar y limpia.
- Permite realizar geometrías complejas de un modo sencillo.

Aunque también existen ciertas desventajas, tales como:

- Si no se tienen los medios adecuados, puede ser una tecnología con poca precisión.
- Los resultados de post-procesado no son tan precisos como los obtenidos con tecnología de láser.

La FFF debido, principalmente, a su barato coste y su amplio catálogo de termoplásticos se convierte en una tecnología utilizada en bastantes campos, tales como la industria del automóvil, medicina, arquitectura, etc.

- **Tecnologías con láser:**

Hoy en día hay varias técnicas de impresión 3D basadas en la tecnología con láser:

- **Estereolitografía, SLA.** [\[6\]](#) [\[7\]](#)

La estereolitografía (SLA, *Stereolithography*) fue inventada por Chuck Hull, fundador de la empresa 3D Systems, en 1983, siendo una tecnología más antigua que la de deposición de material.

Esta técnica funciona mediante la exposición de una capa de resina líquida fotosensible a un rayo láser UV para endurecerse y solidificarse. El láser barre la superficie de la resina líquida de acuerdo con el modelo 3D suministrado. Una vez se ha endurecido una capa, la plataforma de impresión, situada en el tanque líquido de la impresora, hace que baje una capa para que el láser comience a endurecer la siguiente. Formándose así, una

pieza capa por capa. La calidad superficial y cantidad de detalles es muy elevado utilizando este tipo de tecnología

Una vez se ha terminado la impresión, se debe limpiar la pieza con un disolvente, normalmente suele ser isopropanol, para eliminar el exceso de resina no solidificada.

El precio de las impresoras 3D que utilizan esta tecnología varían desde unos 1000€ una de bajo coste hasta decenas de miles de euros que pueden costar las impresoras profesionales.

Cabe destacar que, actualmente, el fabricante estadounidense Carbon3D está trabajando en el método CLIP (Continuous Liquid Interface Production), que permitiría fabricar piezas a una velocidad de impresión 25 o 100 veces más rápida que la actual.

- **Sinterización selectiva por láser, SLS.** [\[8\]](#) [\[9\]](#)

La sinterización selectiva por láser (SLS, *Selective Laser Sintering*) fue desarrollada por el Dr. Carl Deckard, y fue una técnica patentada por DTM Corporation, que a día de hoy se trata de 3D Systems.

La fabricación por SLS consiste en tener un archivo modelado en un programa CAD, que se pasará a un archivo en formato .STL, para ser enviado a una impresora en formato numérico. El ordenador procesa los datos y lo divide por capas, del orden de 0,01 milímetros que es aproximadamente la acumulación de polvo por capa. Posteriormente, un rodillo esparce el polvo por toda la capa y un láser de CO₂ sinteriza la capa, de forma selectiva, siguiendo el formato numérico procesado por el ordenador. Una vez se ha sinterizado una capa, gracias a un pistón colocado sobre la mesa de almacenamiento, se produce una bajada del material, para que el rodillo vuelva a pasar por encima y esparcir el polvo. Se realiza este proceso repetidamente hasta que se haya formado la pieza final.

Esta tecnología se usa en la industria del automóvil, aeronáutica y biomédica, gracias a su alta velocidad de fabricación, gran calidad de piezas final y la diversidad de materiales que se pueden formar. La parte negativa de esta tecnología es su elevado precio para utilizar a nivel unitario, ya que requiere una importante inversión.

En el siguiente enlace, se puede ver cómo funciona esta técnica de impresión 3D (video en inglés): https://youtu.be/9E5MfBAV_tA

Como resumen se compararán en la tabla 3.1 las tecnologías explicadas en base a precio, calidad y velocidad de fabricación.

Técnica	Coste	Calidad de piezas	Velocidad de fabricación
Fabricación con filamento fundido (FFF)	BAJO	MEDIA	ALTA
Estereolitografía (SLA)	ALTO	ALTA	ALTA
Sinterización selectiva por láser (SLS)	ALTO	ALTA	ALTA

Tabla 3.1 – Resumen comparación de las principales tecnologías de impresión 3D

Fuente: Elaboración propia

3.2 Tipos de materiales para impresión 3D

Una vez valoradas las diferentes tecnologías de impresión 3D, se debe estudiar y valorar los diferentes tipos de materiales que se usan hoy en día para elegir el más óptimo para la realización de este trabajo.

- **Impresión mediante tecnología FFF** [\[10\]](#) [\[11\]](#) [\[12\]](#)

Se utiliza una amplia variedad de materiales termoplásticos que se presentan en rollos de filamento, donde cabe destacar los siguientes:

- **Ácido poliláctico, PLA.**

El PLA es un material biodegradable con origen natural, normalmente almidón de maíz. Se trata de un material resistente, con buena calidad de acabado, con excelente estabilidad dimensional y con una alta velocidad de enfriamiento, lo que le hace ideal para prototipados rápidos. El PLA se puede imprimir fácil y rápidamente, ya que no necesita que la cama de la impresora sea calentada previamente debido a su leve encogimiento durante la impresión. Las temperaturas de la boquilla para la impresión suelen variar entorno a los 190°C y 230°C. Por último, destacar que este material tiene una amplia gama de colores disponibles para la impresión.

- **Acrilonitrilo butadieno estireno, ABS.**

El ABS es un material no biodegradable derivado del petróleo. Se trata de un material con una alta resistencia a los impactos y deformaciones. A diferencia con el PLA, el ABS si se encoge durante la impresión, por lo que si necesita que la cama sea calentada previamente a una temperatura alrededor de los 80 y 90°C. Las temperaturas de la boquilla para la impresión suelen estar entorno a los 230°C y 260°C. Se recomienda tener una impresora 3D cerrada para la impresión de los materiales donde se emplee ABS para limitar la emisión de partículas y gases que se desprenden. Por último, destacar que para este tipo de materiales también existe una amplia gama de colores disponibles.

- **Nylon**

El Nylon es un material más resistente y flexible que el PLA y el ABS, que podría tratarse como una buena alternativa a estos dos materiales, pero tiene una serie de problemas, entre los cuales destacan la falta de adherencia a la cama de la impresora y la facilidad con la que coge humedad; por lo que es complicado controlar las deformaciones que se originan. A día de hoy se trabaja principalmente con el Nylon 618, que, para una correcta impresión, la boquilla requiere unas temperaturas en torno a los 240°C.

- **Policarbonato, PC.**

El PC es un material con una alta resistencia y durabilidad, pudiendo soportar temperaturas hasta 150°C sin deformarse, lo cual lo hace idóneo para aplicaciones de ingeniería. Las temperaturas de impresión son elevadas, rondando los 270°C y 300°C. A día de hoy el PC contiene aditivos que permite que su temperatura sea más baja. Actualmente hay escasos fabricantes y proveedores de este material, por lo que para uso individual resulta caro.

- **Tereftalato de polietileno, PET.**

Cabe destacar el PET dado que es un material completamente reciclable, se utiliza comúnmente para piezas destinadas al contacto alimenticio, principalmente en botellas de plástico desechables. Tiene unas temperaturas de impresión parecidas al PLA.

- **Impresión mediante tecnología SLA [13]**

Se utilizan resinas, que son sustancias orgánicas de consistencia pastosa, que se solidifican en contacto con el aire.

Dentro de las resinas utilizadas para impresión 3D, se pueden destacar las siguientes:

- **Resina tipo ABS.**

La resina tipo ABS simula el comportamiento del ABS termoplástico explicado anteriormente. Se utiliza fundamentalmente para piezas sometidas a esfuerzos mecánicos y piezas duraderas. El color de esta resina es verde translúcido.

- **Resina estándar.**

La resina estándar o transparente es de uso universal, alguno de sus usos son prototipos con gran detalle, envases y carcasas. Se trata de una resina fotosensible que tiene un buen acabado superficial, buen comportamiento mecánico y una baja absorción de la humedad. Esta resina se puede presentar en color blanco, gris, negro y transparente.

- **Resina tipo Polipropileno, PP.**

La resina tipo Polipropileno, PP, simula el comportamiento y acabado del polipropileno termoplástico explicado anteriormente, siendo un material dúctil. Sus usos son parecidos a los de la resina estándar (envases, carcasas, cajetines...). El color en el que se suele encontrar esta resina es blanco translúcido.

- **Resina FLEX.**

La resina FLEX es una resina fotosensible flexible, con un buen comportamiento a la compresión gracias a su flexibilidad, con un buen acabado superficial. Se suele utilizar para realizar mangos, amortiguadores y todo tipo de prototipos flexibles. Se presenta en un color negro.

- **Impresión mediante tecnología SLS [14]**

El material principal utilizado para la impresión por SLS es la poliamida, PA, que se trata de un material de larga duración, con una gran resistencia a temperatura y agentes químicos, del cual existen varias derivaciones, se pueden destacar las siguientes:

- **Poliamida fibra vidrio, PA GF.**

Con la PA GF se consigue una elevada resistencia a la fricción. Este tipo se recomienda para piezas funcionales en las cuales se requiere mayor rigidez y ensambles con cierta fricción.

- **Poliamida aluminio, PA AL.**

Con la PA AL se consigue un material de elevada rigidez, con un acabado gris metálico que simula al aluminio. Se recomienda para piezas funcionales con acabado metálico.

- **Poliamida fibra carbono, PA C.**

La PA C aporta un material con una rigidez excelente y con una elevada dureza. Se recomienda para piezas ligeras donde se requiere una elevada rigidez.

3.3 Técnica de impresión empleada y material empleado

En este apartado, se hará un breve resumen de la técnica de impresión utilizada y del material empleado para la realización de las piezas.

- **Técnica de impresión:**

Una vez se han comparado las técnicas que fundamentalmente se utilizan hoy en día, tres parámetros han sido decisivos en la decisión de qué tipo de tecnología emplear.

El primero de los parámetros ha sido la relación “calidad – precio”; como se veía en la tabla 3.1 – resumen comparación de las principales tecnologías de impresión 3D, del *apartado 3.1*, el coste de FFF es bajo y su calidad de pieza media, mientras que el SLA y SLS tienen unos costes altos y unas calidades de pieza elevadas. Por lo que en cuanto a calidad – precio se puede decir que el FFF es más eficiente.

El segundo parámetro tenido en cuenta ha sido la accesibilidad a una impresora de un tipo o de otro, ya como se verá explicado en el *apartado 4.4*, se ha tenido la facilidad a acceder a una de las impresoras con tecnología mediante FFF que tiene John Deere Ibérica S.A, en sus instalaciones de Getafe.

Finalmente, se ha decidido utilizar la técnica de impresión mediante fabricación con filamento fundido, FFF.

- **Material empleado:**

Al haber seleccionado la tecnología de impresión, siendo FFF la elegida, se debe elegir qué tipo de material se quiere emplear. Como se vio en el *apartado 3.2*, hay varios tipos de materiales termoplásticos que se pueden utilizar.

En primer lugar se descartar el PET, ya que se utiliza comunmente para piezas en contacto con alimentos; en segundo lugar se descarta el Nylon, ya que puede dar problemas y el Nylon 618 es caro comparado con el resto de materiales. En tercer lugar se descarta el PC, debido principalmente a su temperatura elevada de impresión, que tiene valores entre los 270°C y 300°C, y como se vera en el *apartado 3.4*, la temperatura de la impresora empleada tiene unos valores entre los 180°C y 280°C, lo que quiza no puede asegurar una correcta impresión con este material.

Finalmente, se tienen dos opciones: PLA y ABS; son materiales con características similares y muy comunes a día de hoy a la hora de realizar piezas por prototipado rápido. Por logistica de la empresa John Deere Ibérica S.A, se ha empleado PLA.

El PLA utilizado es el material que comercializa la empresa Ultimaker, en la figura 3.2 se aprecia la presentación del producto, el cual se puede presentar con una longitud de aproximadamente 44 y/o 95 metros, con un diametro de filamento de $2,85 \pm 0,1$ milimetro.



Figura 3.2 – Material PLA Ultimaker

Fuente: Ultimaker

Las propiedades mecánicas se pueden observar en resumen en la tabla 3.2.

Propiedades	Valor típico
Densidad	$1,24 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Módulo de Young	3,3 – 3,6 GPa
Coefficiente de Poisson	0,39
Límite elástico	55 – 72 MPa
Resistencia a tracción	47 – 70 MPa
Resistencia a compresión	66 – 86 MPa
Elongación	3 – 6 %
Dureza	17 – 27 HV

Tabla 3.2 – Tabla resumen propiedades mecánicas del PLA

Fuente: Elaboración propia

Por último nombrar que se han utilizado dos tipos de colores:

- PLA blanco nacarado (Código de color: RAL 1013)
- PLA negro (Código de color: RAL 9005)

Finalmente, en la tabla 3.3 se puede ver el resumen de la técnica de impresión elegida y material empleado.

Selección	Nombre	Siglas
Técnica de impresión	Fabricación con filamento fundido	FFF
Material empleado	Ácido poliláctico	PLA

Tabla 3.3 – Resumen de la selección

Fuente: Elaboración propia

3.4 Impresora utilizada

En primer lugar, destacar el agradecimiento y la colaboración de John Deere Ibérica S.A, que ha sido la encargada de facilitar la impresión 3D en sus instalaciones en Getafe.

En sus instalaciones disponen de diversas impresoras 3D, y para este estudio se ha facilitado la utilización de la impresora **Ultimaker 3 Extended**, la cual se aprecia en la figura 3.3.



Figura 3.3 – Impresora Ultimaker 3 Extended

Fuente: Ultimaker

Se trata de una impresora de la empresa Ultimaker, que fue fundada oficialmente en el año 2011 por Siert Wijnia, Martijn Elserman y Erik de Bruijn. Se trata de una empresa encargada de desarrollar impresoras 3D, softwares de impresión 3D y materiales de impresión 3D.

En concreto, la impresora Ultimaker 3 Extended [\[15\]](#) es un producto lanzado por la compañía en 2016, utiliza una tecnología de fabricación por filamento fundido (FFF), tiene un cabezal de impresión con doble extrusor, el cual se observa en la figura 3.4, siendo capaz de imprimir con materiales como el Nylon, PLA o ABS y soportes con material PVA soluble en agua, con un diámetro de filamento de 2.85mm.



Figura 3.4 – Cabezal con doble extrusor

Fuente: Ultimaker

Las dimensiones físicas de la impresora se pueden observar en la tabla 3.4.

Dimensiones físicas Ultimaker 3 Extended	
Impresora sin accesorios montados	353 x 338 x 488 (mm)
Impresora con accesorios montados	493 x 338 x 688 (mm)
Peso neto	11.3 (kg)

Tabla 3.4 – Dimensiones físicas impresora Ultimaker 3 Extended

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones de la bandeja de impresión se pueden observar en la tabla 3.5.

Dimensiones bandeja de impresión Ultimaker 3 Extended	
Bandeja impresión (Uso boquilla derecha)	213 x 213 x 300 (mm)
Bandeja impresión (Uso boquilla izquierda)	213 x 213 x 300 (mm)
Bandeja impresión (Uso doble extrusor)	197 x 215 x 300 (mm)

Tabla 3.5 – Dimensiones bandeja de impresora Ultimaker 3 Extended

Fuente: Elaboración propia

La bandeja de impresión trabaja en un rango de temperaturas de 20°C a 100°C.

Las boquillas del extrusor tienen una dimensión de 0.4mm de diámetro y trabajan en un rango de temperatura entre 180°C y 280°C, dependiendo del material. En este caso, se ha empleado una temperatura de impresión de 200°C para el PLA.

La velocidad de recorrido del cabezal trabaja a una velocidad mínima de 30 mm/s y a una velocidad máxima de 300 mm/s, mientras que la velocidad del flujo de material es de 16mm³/s.

Cabe destacar la precisión de la impresora, que tiene una precisión en los ejes X e Y de 12.5µm y en eje Z de 2.5µm.

Se trata de una impresora que para el procesamiento previo, emplea el software comercial CURA para la impresión 3D. En la figura 3.5 se puede observar como es el entorno de trabajo de este software, en este caso, se ve como ha sido caracterizado el cuerpo del plato.

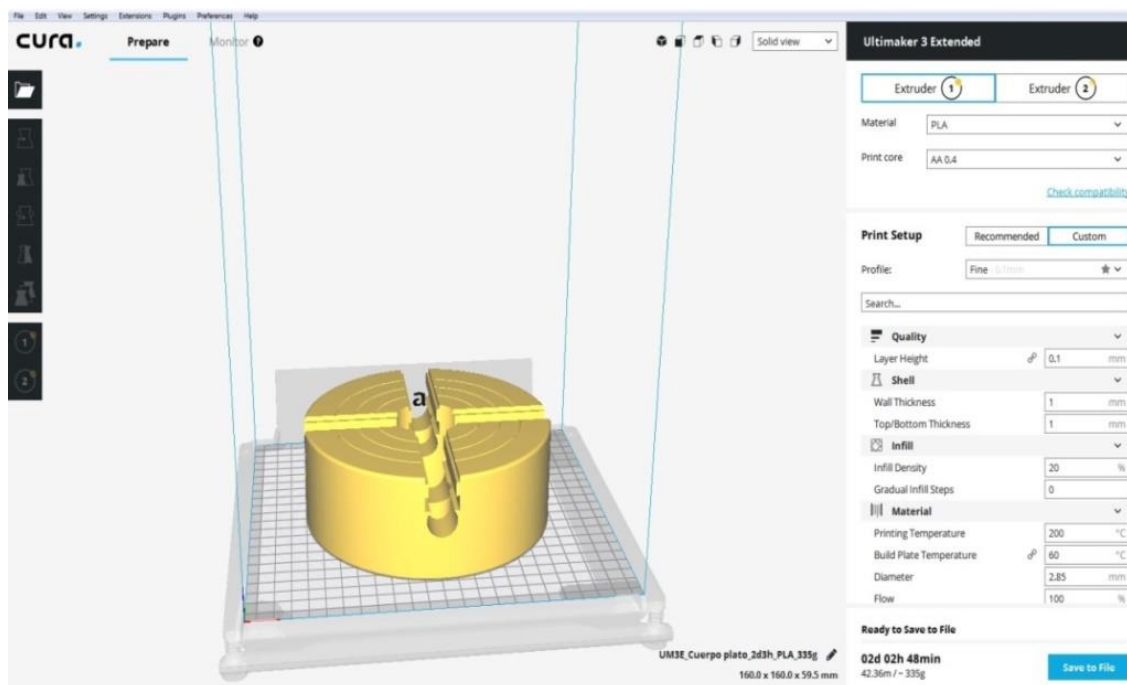


Figura 3.5 – Entorno de trabajo del software CURA

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.6, siguiendo el ejemplo anterior del cuerpo del plato, se puede ver cómo el software ha caracterizado y calculado la estructura, siendo triangulada, para evitar deformaciones en la pieza.

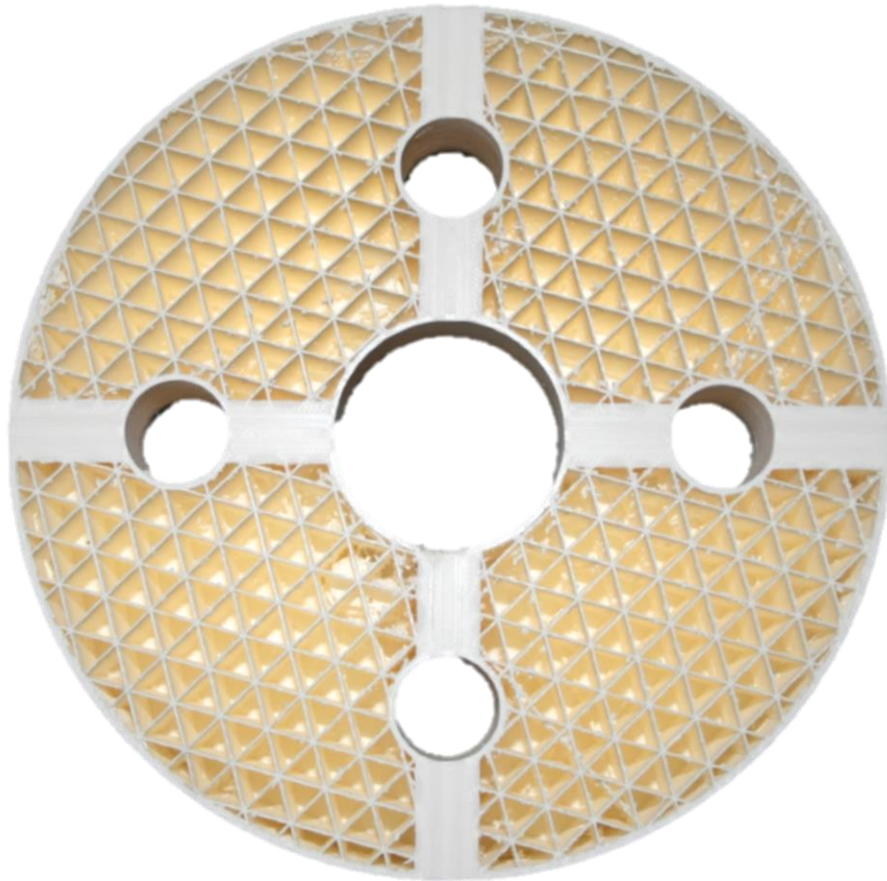


Figura 3.6 – Tornillo movedor de la garra impreso en 3D

Fuente: Elaboración propia

Para la impresión completa del plato, se ha impreso en 6 fases diferentes, una para cada pieza que conforman el plato final. Los tiempos de impresión para cada fase han sido los siguientes:

- 1 Cuerpo del plato: 50 horas
- 4 Garras: 24 horas
- 4 Tornillos movedores de la garra: 10 horas
- 4 Sujeciones de tornillos: 8 horas
- 3 Tornillos inferiores largos: 3 horas
- 3 Tornillos inferiores pequeños: 2 horas

Lo que hace un tiempo de impresión total de 97 horas, lo que es igual a algo más de 4 días completos.

3.5 Plato de garras impreso en 3D

A continuación, se muestra el resultado obtenido de la impresión 3D, primero se indica pieza por pieza, con una vista en perspectiva isométrica.

En la figura 3.7 se puede apreciar el cuerpo del plato de 4 garras.



Figura 3.7 – Cuerpo del plato impreso en 3D

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.8 se observa una de las garras del plato.



Figura 3.8 – Garra impresa en 3D

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.9 se puede ver el tornillo movedor de la garra.



Figura 3.9 – Tornillo movedor de la garra impreso en 3D

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.10 se aprecia la sujeción del tornillo movedor de la garra.



Figura 3.10 – Sujeción tornillo movedor de la garra impreso en 3D

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.11 se puede apreciar el tornillo inferior largo.



Figura 3.11 – Tornillo inferior largo impreso en 3D

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.12 se ve el tornillo inferior pequeño.



Figura 3.12 – Tornillo inferior pequeño impreso en 3D

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el plato de 4 garras ensamblado impreso en 3D, se puede observar en la figura 3.13.

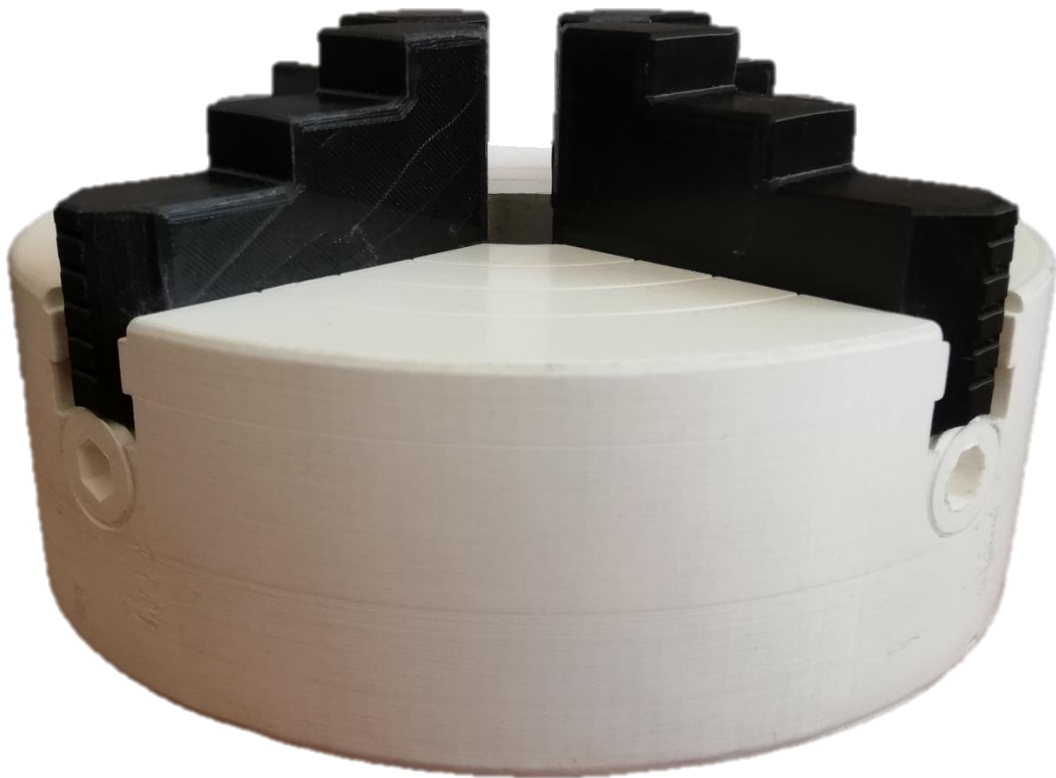


Figura 3.13 – Plato completo impreso en 3D

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4

Metodología

4.1 Método analítico

Para el seguro funcionamiento de un torno, la fuerza del útil de sujeción que se esté empleando debe ser mayor que la fuerza de corte de la máquina.

La fuerza de corte es directamente proporcional a la velocidad de giro que se produce, ya que, a mayor velocidad de giro, mayor fuerza de corte; de esta forma, además de ahorrar tiempo, también se produce un incremento de la calidad superficial. A mayor velocidad de giro, menor fuerza de amarre del plato debido a la fuerza centrífuga generada en el proceso de torneado. [\[17\]](#)

A continuación, se puede ver un esquema aclaratorio de la relación existente entre fuerzas y velocidad de giro.

$\downarrow \text{Velocidad de giro} \rightarrow \downarrow \text{Fuerza de corte} \rightarrow \uparrow \text{Fuerza de amarre}$

$\uparrow \text{Velocidad de giro} \rightarrow \uparrow \text{Fuerza de corte} \rightarrow \downarrow \text{Fuerza de amarre}$

Por lo que, se va a presentar un modelo analítico para calcular la fuerza de amarre necesaria en un plato de cuatro garras para los procesos de torneado.

Para valorar el plato de cuatro garras diseñado e impreso en 3D, lo comparemos con otro modelo idéntico en forma pero de distinto material. De esta manera se tendrá una comparativa real entre ambos.

En primer lugar, se deben conocer las fuerzas y momentos que actúan en un plato de garras mientras éste está funcionando en un proceso de torneado; en la figura 4.1 se puede apreciar un pequeño esquema de las fuerzas.

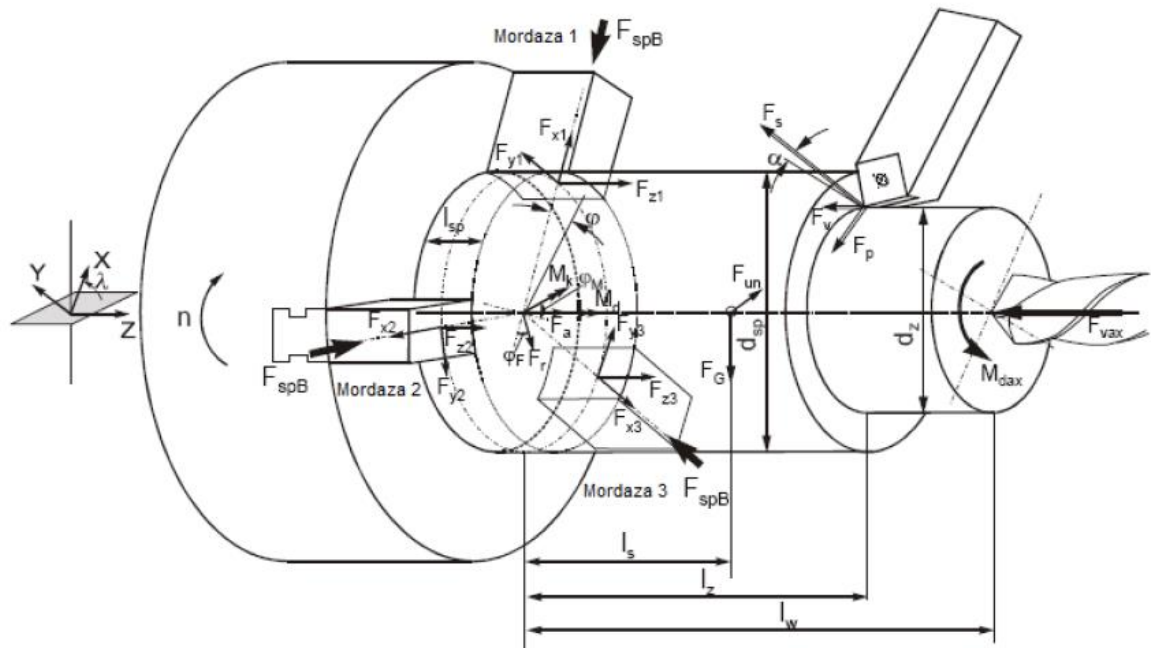


Figura 4.1 – Fuerzas y momentos en un plato de garras

Fuente: J. Arturo Mendonza Razo (Cálculo de la fuerza de sujeción en Chuck)

A continuación, se debe tener claro que la fuerza total de amarre, F_{spz} , debe ser superior al momento torsor, M_T , generado por la fuerza de corte, ya que, si no se produce este hecho, la máquina no está trabajando en condiciones seguras.

Para calcular la fuerza total de amarre, F_{spz} , se utilizará la siguiente formula: [\[18\]](#)

$$F_{spz} = S_{sp} \cdot (F_{spo} \pm F_{cen})$$

Siendo:

- F_{spo} = Fuerza inicial de amarre
- F_{cen} = Fuerza centrípeta
- S_{sp} = Coeficiente de seguridad, debe ser mayor que 1.5

La fuerza inicial de amarre está relacionada con la fuerza principal de corte y se puede calcular de la siguiente manera: [\[19\]](#)

$$F_{spo} = \frac{F_c \cdot S_z}{\mu_{sp}} \cdot \frac{D_A}{D_F}$$

Siendo:

- F_c = Fuerza principal de corte
- S_z = Coeficiente de seguridad, debe ser mayor que 2
- μ_{sp} = Coeficiente de fricción entre pinza y pieza
- D_A = Diámetro a mecanizar
- D_F = Diámetro de sujeción

El valor de los coeficientes de seguridad, S_{sp} y S_z están recomendados por la norma armonizada EN 1550 [20] y la recomendación VDI 3106 [21].

La fuerza centrípeta se calculará de la siguiente manera: [18]

$$F_{cen} = m_w \cdot r_e \cdot \left(\frac{\pi \cdot N}{30} \right)^2$$

Siendo:

- m_w = Masa del plato
- r_e = Radio de rotación
- N = Velocidad de rotación (expresada en $\frac{rev}{min}$)

Por otro lado, también se debe calcular el momento torsor, M_T , generado por la acción de la fuerza de corte, que se hará con la siguiente ecuación: [18]

$$M_T = F_c \cdot \frac{D_F}{2}$$

Siendo:

- F_c = Fuerza principal de corte
- D_A = Diámetro a sujeción

Para calcular la fuerza principal de corte, se descomponen en las tres direcciones principales; X,Y,Z:

$$\bar{F}_c = \bar{F}_p + \bar{F}_s + \bar{F}_v$$

Las componentes vienen definidas por las siguientes fórmulas: [19]

$$F_p = b \cdot k_p \cdot h^{1-m_p}$$

$$F_s = b \cdot k_s \cdot h^{1-m_s}$$

$$F_v = b \cdot k_v \cdot h^{1-m_v}$$

Siendo:

- k_p , k_s y k_v = Fuerzas específicas de corte de la pieza de trabajo.
- $1 - m_p$, $1 - m_s$ y $1 - m_v$ = Coeficientes incrementales de la fuerza de corte
- $b = \frac{a}{\text{sen}\chi_H} \rightarrow$ Ancho de viruta, siendo: a = Profundidad del corte; χ_H = Angulo de la plaquita con la horizontal
- $h = s \cdot \text{sen}\chi_H \rightarrow$ Espesor de la viruta, siendo: s = Velocidad de avance de la herramienta de corte; χ_H = Angulo de la plaquita con la horizontal

Cabe destacar, que la componente generada en dirección Z, F_v , queda asumida por el tope del elemento de amarre; mientras que la componente generada en dirección X, F_p , queda absorbida por la propia pinza. Por lo que, la única componente que generará el momento torsor nombrado anteriormente, es la componente en dirección Y, F_s .

Finalmente, queda analizar la influencia de la velocidad de corte a la fuerza de corte; para relacionar ambos parámetros se emplea la siguiente ecuación: [19]

$$F_c = b \cdot k_s \cdot V_c^{-m_s} \cdot h^{(1-m_s) \cdot V_c^{n_s}}$$

De esta manera, teniendo los datos técnicos de un torno y de los materiales empleados, se puede desarrollar el análisis numérico de este estudio.

Para realizar este método, se tienen que en cuenta los estudios realizados con anterioridad; siempre se basarán en dichos estudios.

En primer lugar, se desea calcular la fuerza inicial de amarre del plato:

- **Fuerza inicial de amarre, F_{spo} :**

Como se definió anteriormente:

$$F_{spo} = \frac{F_c \cdot S_z}{\mu_{sp}} \cdot \frac{D_A}{D_F}$$

Para realizar el cálculo, y como se indicó anteriormente, el coeficiente de seguridad, S_z debe ser mayor que 2 basándonos en la norma EN 1550 y la recomendación VDI 3106, por lo que en este caso:

$$S_z = 2$$

El valor del coeficiente de fricción y pieza, varía dependiendo de la superficie de la pieza y la superficie de la garra de amarre; se basará este valor en la página de *Structx*, y seleccionando el valor intermedio entre los valores máximos y mínimos del coeficiente de fricción sin lubricación:

$$\mu_{spacero} = 0,65$$

$$\mu_{spPLA} = 0,3$$

De esta manera, se va a producir una diferenciación entre ambos modelos, ya que nos interesa tener un modelo de referencia, como es el contacto acero – acero, ya que los platos industriales están fabricados de acero.

A continuación, se debe saber el valor de la fuerza principal de corte, que se calculará de la siguiente manera:

$$F_c = s \cdot t \cdot k_c$$

Siendo:

- s = avance
- t = profundidad de corte
- k_c = presión específica de corte

Tomando como referencia estudios realizados con anterioridad [\[3\]](#), se sacan los siguientes valores:

$$s = 0,5 \frac{mm}{rev}$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

Cabe destacar, que para el desarrollo, el ángulo de posición del portaherramientas será de 45°, y la pieza a mecanizar se tratará de un acero C45 debido a su gran capacidad de mecanizado y transformación, por lo que, el valor de la presión específica de corte para el acero C45 con un ángulo de posición de 45° es de:

$$k_c = 2,5 \frac{KN}{mm^2}$$

Por lo que, la fuerza principal de corte es:

$$F_c = 0,5 \cdot 5 \cdot 2,5 = 6,25 \text{ KN} = 6250 \text{ N}$$

Siendo D_A el valor de un diámetro en mecanizar en este caso se supondrá que la barra a mecanizar tiene el siguiente diámetro:

$$D_A = 50 \text{ mm}$$

Sabiendo que D_F viene definido por el diámetro interior del plato:

$$D_F = 42 \text{ mm}$$

Ahora se puede sacar el valor de la fuerza inicial de amarre, F_{spo} , para el caso acero-acero:

$$F_{spo} = \frac{F_c \cdot S_z}{\mu_{sp}} \cdot \frac{D_A}{D_F} = \frac{6250 \cdot 2}{0,65} \cdot \frac{50}{42} = 22893 \text{ N} = 22,893 \text{ KN}$$

ACERO – ACERO

$$F_{spo} = 22,893 \text{ KN}$$

Para el caso del valor de la fuerza inicial de amarra, F_{spo} , para el caso PLA-acero:

$$F_{spo} = \frac{F_c \cdot S_z}{\mu_{sp}} \cdot \frac{D_A}{D_F} = \frac{6250 \cdot 2}{0,3} \cdot \frac{50}{42} = 49603 \text{ N} = 49,603 \text{ KN}$$

PLA – ACERO

$$F_{spo} = 49,603 \text{ KN}$$

Posteriormente, se calcula la fuerza total de amarre:

- **Fuerza total de amarre, F_{spz} :**

Como se definió con anterioridad:

$$F_{spz} = S_{sp} \cdot (F_{spo} \pm F_{cen})$$

Para realizar el cálculo, y como se indicó anteriormente, el coeficiente de seguridad, S_{sp} debe ser mayor que 1,5 basándonos en la norma EN 1550 y la recomendación VDI 3106, por lo que en este caso:

$$S_{sp} = 1,5$$

Seguidamente, se debe calcular la fuerza centrífuga que se genera durante el funcionamiento de la máquina-herramienta.

$$F_{cen} = m_w \cdot r_e \cdot \left(\frac{\pi \cdot N}{30} \right)^2$$

En este caso se tiene el valor de la masa del plato como:

$$m_w = 450 \text{ g} = 0,45 \text{ kg}$$

Se debe obtener el radio de rotación, que se corresponderá con la mitad del diámetro de sujeción, es decir:

$$r_e = \frac{D_F}{2} = \frac{42}{2} = 21 \text{ mm}$$

Se debe dar un valor a las revoluciones por minuto; y nuevamente, basándose en estudios realizados con anterioridad [3], se obtiene un valor:

$$N = 3000 \frac{rev}{min}$$

Por lo que, se puede obtener la fuerza centrífuga:

$$F_{cen} = 0,45 \cdot 21 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 3000}{30} \right)^2 = 932,68 \text{ N} = 0,933 \text{ KN}$$

Por lo que, finalmente se puede obtener la fuerza total de amarre del plato en contacto acero – acero para un correcto funcionamiento cuando aparece la fuerza centrífuga:

$$F_{spz} = 1,5 \cdot (22,893 - 0.933) = 32,94 \text{ KN}$$

ACERO – ACERO

$$F_{spz} = 32,94 \text{ KN}$$

Posteriormente, se calcula la fuerza total de amarre del plato en contacto PLA – acero para un óptimo funcionamiento cuando aparece la fuerza centrífuga:

$$F_{spz} = 1,5 \cdot (49,603 - 0.933) = 73,005 \text{ KN}$$

PLA – ACERO

$$F_{spz} = 73,005 \text{ KN}$$

Para finalizar los cálculos analíticos, se debe calcular el momento torsor que se genera en el plato de amarre debido a la fuerza principal de corte:

- **Momento torsor generado por la fuerza principal de corte, M_{corte} :**

Dicho momento torsor está definido con la siguiente fórmula, basada en estudios realizados con anterioridad: [\[18\]](#)

$$M_{corte} = F_c \cdot \frac{D_F}{2}$$

Por lo que, sabiendo los valores numéricos, se obtiene:

$$M_{corte} = 6250 \cdot \frac{42 \cdot 10^{-3}}{2} = 131,25 \text{ Nm}$$

$$M_{corte} = 131,25 \text{ Nm}$$

4.2 Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos, conocido como MEF, juega un papel fundamental en la resolución de problemas en el ámbito ingenieril, debido a que permite resolver problemas matemáticos complejos.

4.2.1 Introducción a los elementos finitos

Mediante el MEF se puede diseñar y realizar un modelo matemático de cálculo basado en métodos de discretizado que permite evaluar mediante computadora las condiciones del prototipo que se desea.

El constante avance tecnológico ha hecho que los programas capaces de realizar elementos finitos estén a disposición de cualquier usuario, sin embargo, para su correcto funcionamiento, se debe tener una serie de conocimiento tanto del software que se está utilizando, como de los principios del MEF.

Aunque no deja de ser un método de aproximación, ya que no se tiene la pieza físicamente, sino en computadora, ha supuesto un gran avance debido al ahorro de costes a la hora de diseñar y fabricar una pieza; antiguamente, se realizaban prototipos que se enseñaban y posteriormente se introducían mejoras, de este modo, se puede analizar el prototipo mediante la computadora y poder cambiar las condiciones de la pieza que se quiere obtener para que tenga el rendimiento y requisitos propuestos inicialmente. [\[3\]](#)

4.2.2 Historia de los elementos finitos

El concepto de elementos finitos parte de la idea del empleo de métodos de discretizado, que se tiene registro de que se comenzaron a utilizar varios siglos atrás.

En la antigüedad, el método de elementos finitos se utilizaba para determinar un valor aproximado del número π .

Arquímedes utilizaba este método para calcular el área de figuras planas; con Newton y Leibniz se desarrolla el cálculo integral y se añaden nuevas herramientas, permitiendo resolver problemas complejos. Poco después, Walter Ritz, físico suizo, formalizó por

primera vez el método de elementos finitos; desarrolló la formulación del MEF con base en el cálculo variacional. Más tarde, el ingeniero ruso Boris G. Galerkin incorporó el cálculo matricial al método de elementos finitos. Se han añadido otros métodos recientemente, como el método de los mínimos cuadrados método de Oden. [\[16\]](#)

Sin embargo, a mediados del siglo XX, con el avance tecnológico y la aparición de computadoras es cuando se comienza a expandir el MEF, ya que la computadora resuelve las ecuaciones que se plantean en el método de elementos finitos de manera eficaz y correcta.

4.2.3 Ventajas y desventajas

El método de los elementos finitos es una herramienta fundamental para personas que deseen obtener información sobre el comportamiento de piezas y estructuras funcionando bajo cualquier tipo de carga, ya sea puntual, variable, de presión, térmica... Permite el análisis de problemas tanto independientes como dependientes del tiempo, lineales o no lineales. Se puede aplicar con cualquier tipo de material del cual se conozcan sus propiedades. [\[3\]](#)

El MEF ha supuesto un gran avance a nivel empresarial, ya que ha provocado una reducción considerable de los tiempos de desarrollo del producto, como se comentaba anteriormente, ya no se tienen que hacer prototipos cada vez que se desee ensayar el producto, sino que se puede simular y analizar mediante computadoras.

Una de las principales desventajas de este método es la dependencia de la densidad de elementos en la etapa del mallado para obtener resultados muy precisos; ya que si no se tienen en cuenta las zonas donde existe mayor concentración de esfuerzos o cargas, se pueden obtener resultados no confiables.

Otro punto negativo es la aplicación de este método sin los conocimientos necesarios, ya que se trata de una herramienta muy potente que, si no se entiende la física y matemática que hay detrás del modelo, se pueden llegar a obtener conclusiones erróneas.

4.2.4 Modelo de los elementos finitos

Para la realización del modelo de los elementos finitos, se ha utilizado el software comercial ANSYS WORKBENCH 19.1 versión estudiante, ya que se trata de un software gratuito.

Para realizar el análisis, en primer lugar, se debe seleccionar que tipo de estudio se quiere realizar, en este caso será un estudio estructura estático (*Static Structural*); una vez seleccionado el tipo de estudio, se abrirá una pestaña como la observada en la figura 4.2, donde se indican los pasos a seguir para llevar a cabo el análisis.

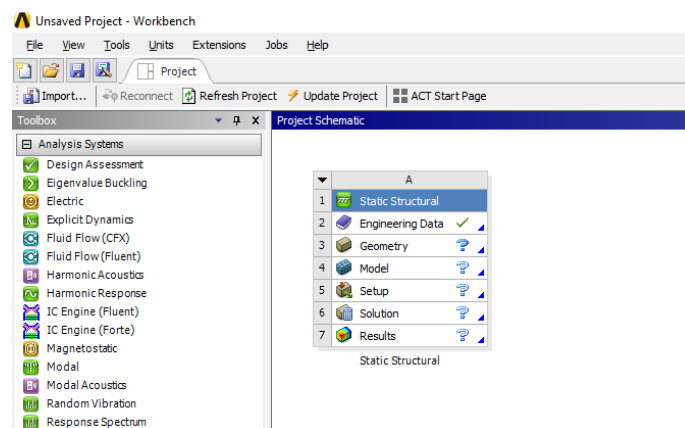


Figura 4.2 – Entorno de trabajo Static Structural

Fuente: Elaboración propia

Una vez se ha abierto esta pestaña con título A, se comprueba el material y sus características en la pestaña de *Engineering Data*; posteriormente, se pasa a la siguiente pestaña, *Geometry*, que permitirá crear un nuevo boceto y con ello una nueva pieza, o cargar una pieza ya realizada en otro software, como será en este caso.

Debido al límite de 32000 número de nodos más elementos que se pueden mallar para la simulación en versión académica de ANSYS, se ha realizado una simplificación del modelo empleado, para ello se han omitido las roscas, chaflandes y redondeos, lo que provocará una reducción considerable de los nodos y elementos que se forman al mallar la pieza. También cabe destacar que debido a dicha limitación, la precisión de la simulación se verá afectada; produciéndose resultados menos exactos.

En la figura 4.3 se puede observar como es en el entorno de trabajo en este paso para el plato de cuatro garras simplificado.

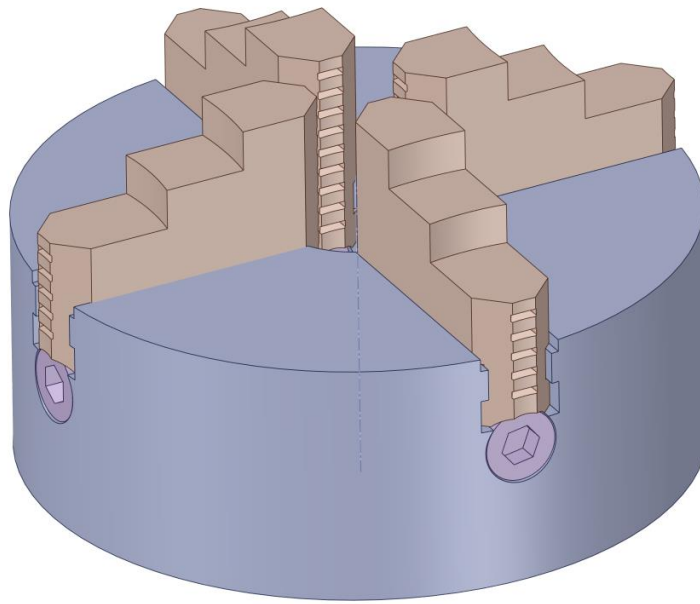


Figura 4.3 – Geometry en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

También, cabe destacar que se ha simplificado el modelo quitando el tornillo de apriete del tornillo pasador para la nariz del husillo de la máquina-herramienta.

Una vez se ha cargado correctamente la geometría, se debe pasar al paso *Model*. En la figura 4.4 se puede ver cómo se presenta la pieza deseada en este paso.

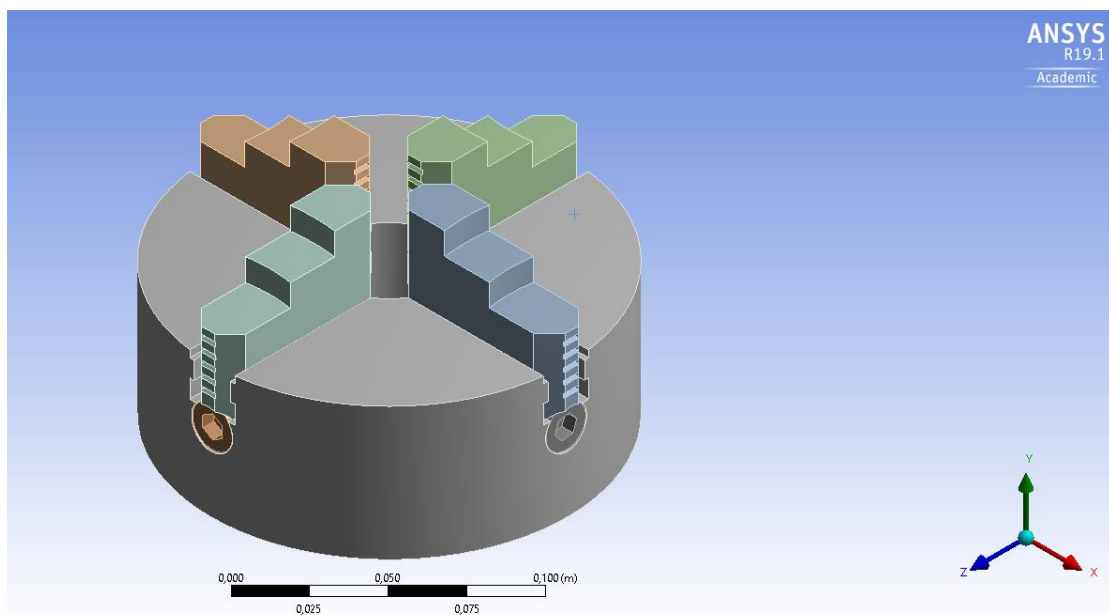


Figura 4.4 – Model en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

En este paso, en primer lugar, se debe comprobar y asignar el material, en la barra de tareas en *Geometry*, se puede asignar el material por cada pieza del ensamblaje, que se comprobó en el primer paso en *Engineering Data*. En este caso, se harán dos pruebas, la primera con un acero estructural y la segunda con ácido poliláctico, PLA.

Las características necesarias para definir el acero estructural, se corresponden a las que aparecen en la tabla 4.1.

Propiedades	Valor típico
Densidad	7850 kg/m ³
Módulo de Young	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Límite elástico	250 MPa
Tensión de rotura	460 MPa

Tabla 4.1 – Propiedades del acero estructural empleadas

Fuente: Elaboración propia

Mientras que las características para definir el PLA son las correspondientes a las vistas en la tabla 4.2.

Propiedades	Valor típico
Densidad	1250 kg/m ³
Módulo de Young	3,15 GPa
Coefficiente de Poisson	0,39
Límite elástico	60 MPa
Tensión de rotura	65 MPa

Tabla 4.2 – Propiedades del PLA empleadas

Fuente: Elaboración propia

Una vez asignado el material, se procede a realizar el mallado de la pieza, para ello hay que ir a la barra de tareas, en *Mesh*, en primer lugar, se elige el estudio mecánico, *Mechanical*, el resto de parámetro se dejan por defecto.

Posteriormente, se realiza la malla, para ello se emplea el mallado automático que está incorporado en ANSYS, pero controlando el tamaño de elemento en las garras y en el plato, siendo de 0,1m el tamaño de elemento en la garra y de 0,06 el tamaño de elemento del cuerpo; de este modo en la figura 4.5 se observa el resultado de realizar este mallado.

Al realizar el mallado se obtienen un total de 20372 nodos y 10842 elementos, lo que hacen un total de 31214 elementos más nodos, lo que está justo al límite del mallado con la licencia de ANSYS academic.

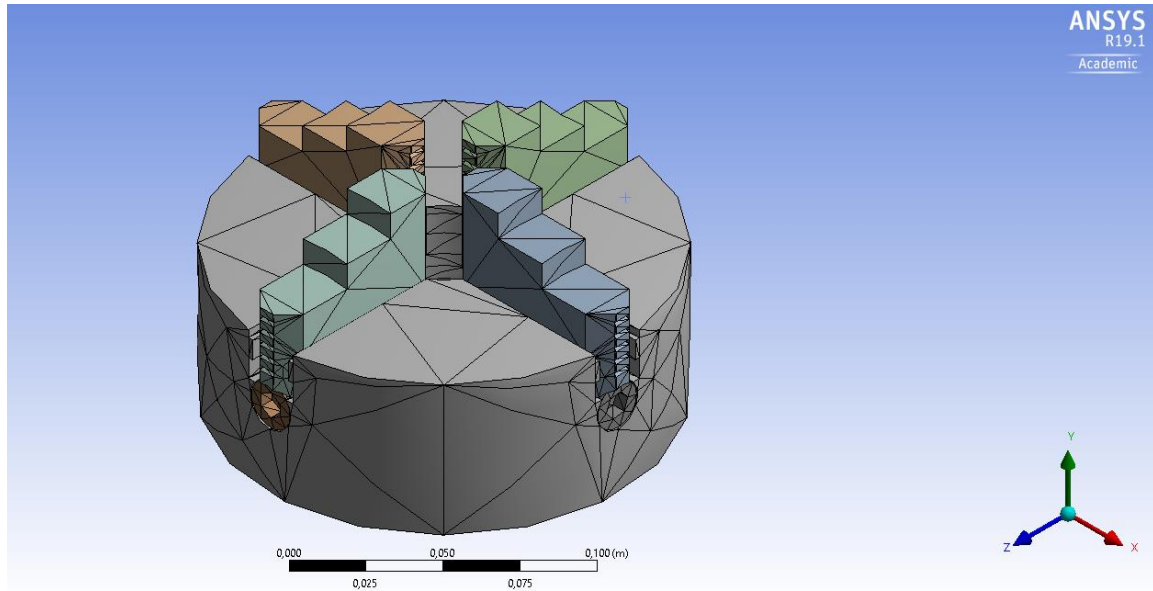


Figura 4.5 – Mallado del plato en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.6 se puede apreciar mejor el mallado en las garras, que serán las partes críticas del estudio.

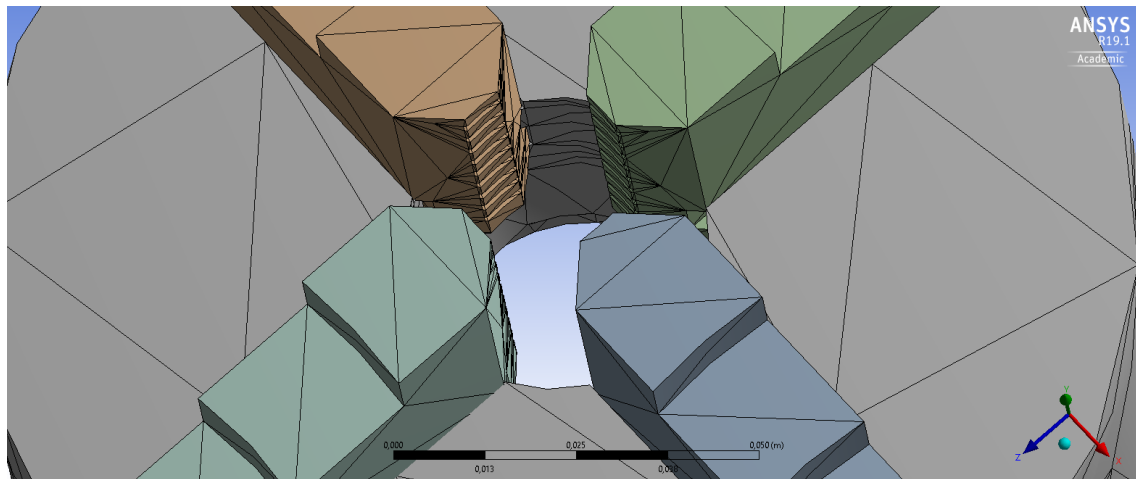


Figura 4.6 – Mallado en detalle en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se deben asignar las fuerzas correspondientes a cada ensayo que se desea realizar; dichas fuerzas han sido calculas en el apartado 4.1 *Método analítico*.

En primer lugar, se debe añadir la velocidad de giro deseada, siendo este valor igual para ambos ensayos: $N = 3000 \text{ rev/min}$. En ANSYS, las unidades de velocidad angular son rad/s, por lo que se: $N = 314,16 \text{ rad/s}$. En la figura 4.7 se puede observar como esta velocidad ya fue añadida en el ensayo.

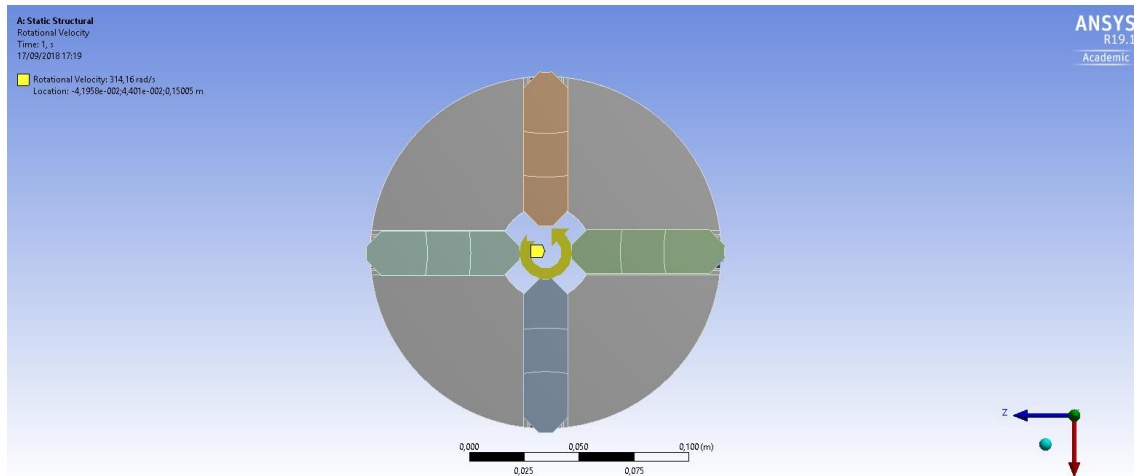


Figura 4.7 – Velocidad angular en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso, consiste en añadir el valor del momento torsor provocado por la fuerza de corte de la máquina – herramienta, este parámetro también fue calculado en el apartado 4.1 *Método analítico*, resultado un valor de: $M_{corte} = 131,25 \text{ Nm}$.

Dicho parámetro se debe insertar en la zona de contacto del plato con la barra de material, es decir, en las superficies de las garras, se supone que se realizará un estudio con sujeción interna; se inserta en el programa con sentido opuesto a la velocidad angular, ya que se es opuesta a la misma. Este momento torsor provoca que el extremo libre de la barra de material obtenga el valor del máximo ángulo de giro.

En la figura 4.8 se observa cómo se ha añadido dicho momento en ANSYS para la simulación del ensayo.

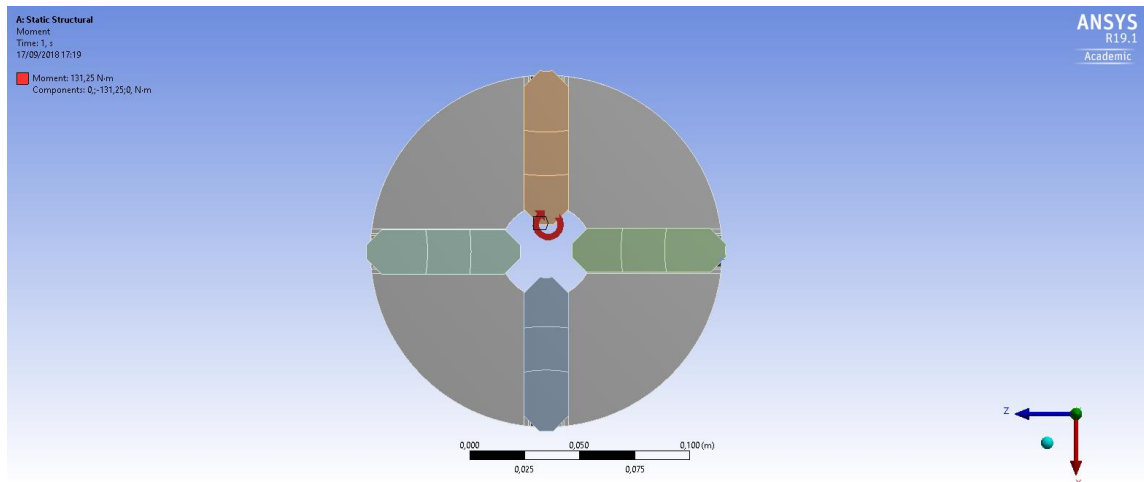


Figura 4.8 – Momento torsor en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

Una vez introducidos la velocidad de rotación y el momento torsor generado por la fuerza principal de corte, se deben introducir las fuerzas de amarre en la zona de contacto entre pinza – pieza para cada caso de estudio.

En el primer caso de estudio, en el contacto acero – acero, el valor de dicha fuerza equivale a: $F_{spz} = 32,94 \text{ KN}$, como se trata de un plato de cuatro garras, se repartirá cada fuerza en cuatro partes iguales, por lo que la fuerza de amarre total por cada garra equivale a: $F_{spz1garra} = 8,235 \text{ KN}$

En el segundo caso de estudio, en el contacto PLA – acero, el valor de dicha fuerza equivale a: $F_{spz} = 73,005 \text{ KN}$, y al igual que en el caso anterior, la fuerza se reparte entre las cuatro garras, por lo que, la fuerza de amarre total por cada garra equivale a: $F_{spz1garra} = 18,25 \text{ KN}$.

En la figura 4.9 se puede apreciar cómo se han añadido la fuerza, en este caso se particulariza al contacto acero – acero.

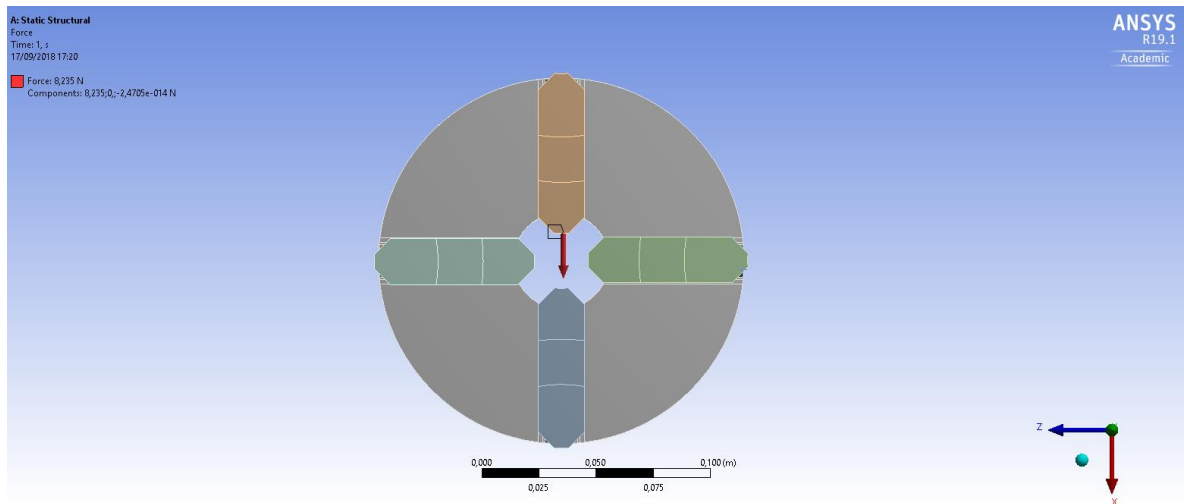


Figura 4.9 – Fuerza de amarre acero – acero en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.10 se puede ver una imagen de todas las fuerzas, momentos y velocidades angulares del problema.

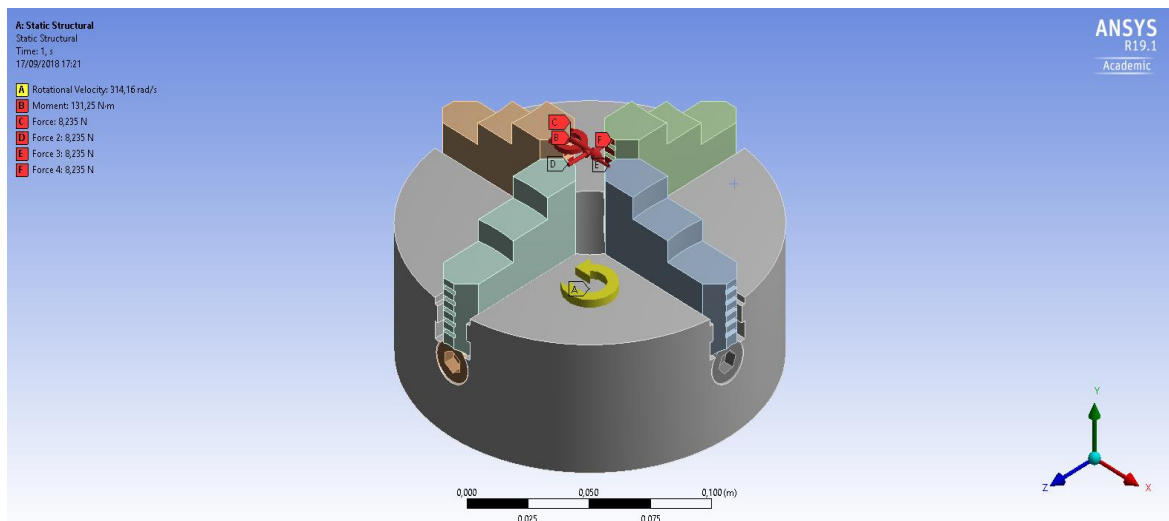


Figura 4.10 – Resumen acero – acero en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.11 se puede apreciar cómo se ha añadido la fuerza, en este caso se particulariza en el contacto PLA – acero.

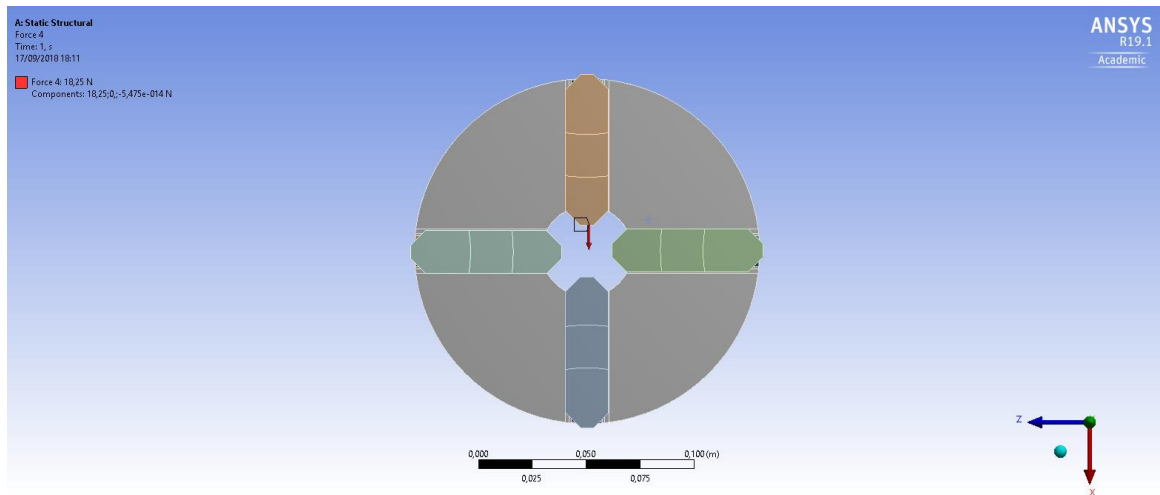


Figura 4.11 – Fuerza de amarre PLA – acero en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.12 se aprecia el resumen de las fuerzas, momentos y velocidades angulares del ensayo.

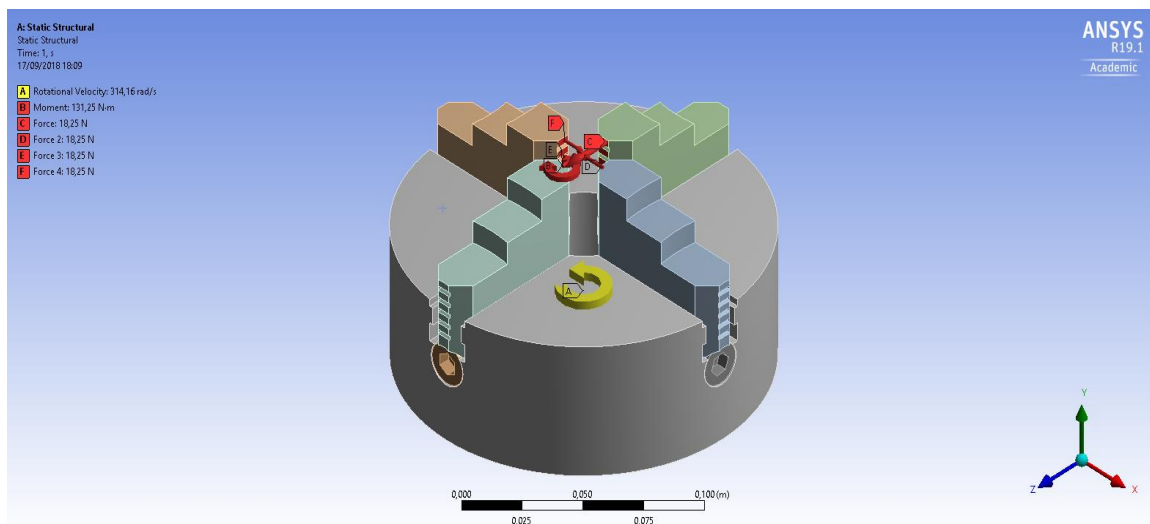


Figura 4.12 – Resumen PLA – acero en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

Para terminar de definir el ensayo que se desea realizar, se debe fijar una restricción de movimiento, en el programa se trata de *Fixed support*, en este caso, se tratará de un empotramiento por los tornillos posicionadores para la nariz del husillo de la máquina-herramienta.

Esta restricción convierte al ensayo en un análisis estático, evitando de este modo posibles movimientos o desplazamientos en la pieza. Se trata de unas restricciones idénticas para ambos tipos de ensayos.

En la figura 4.13 aparece representado en el programa ANSYS cómo quedan estas restricciones.

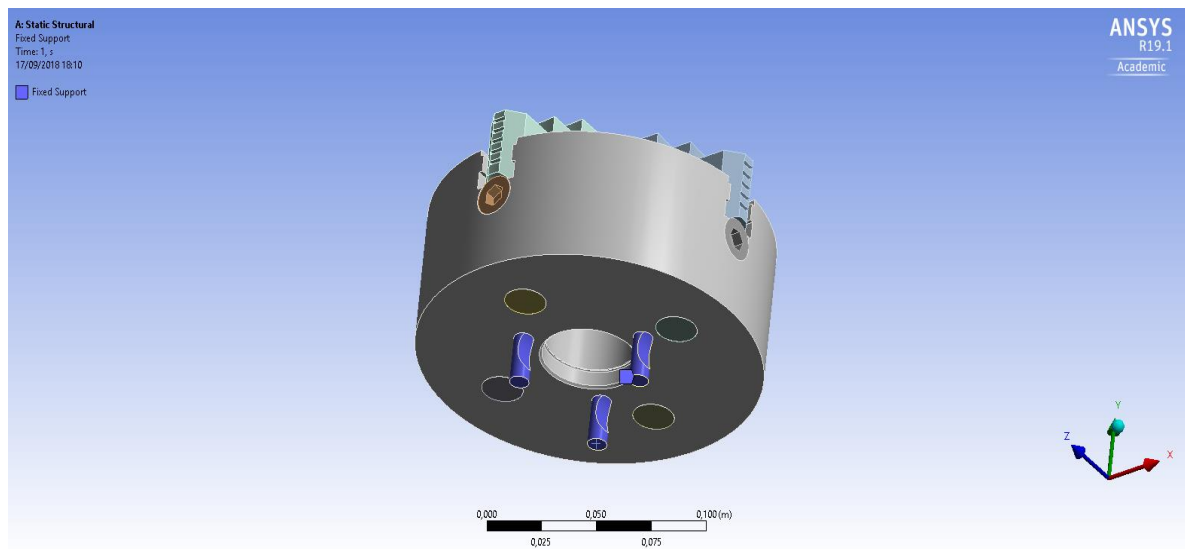


Figura 4.13 – Restricción de movimiento en ANSYS

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1 Resultados obtenidos

En este apartado se comentan y analizan los resultados obtenidos, en primer lugar, se hablará de los resultados obtenidos analíticamente y, posteriormente, de los obtenidos del método numérico.

Cabe recalcar, que se han analizado dos modelos, uno con un plato fabricado de acero, es decir, contacto pinza – pieza de acero – acero; y en otro lugar, un plato fabricado de PLA, es decir, contacto pinza – pieza de PLA – acero.

5.1.1 Resultados método analítico

En primer lugar, cabe recalcar la primera diferencia fundamental entre los tipos de contactos estudiados, que se trata de su coeficiente de fricción, siendo del valor de 0,65 el contacto entre acero – acero y el valor de 0,3 el contacto entre PLA – acero; lo que indica el coeficiente de fricción, es que a mayor valor del mismo, la fuerza de rozamiento disminuirá, por lo que, será necesario mayor fuerza de amarre.

Al realizar los cálculos se obtienen que la fuerza de amarre inicial, sin tener en cuenta la fuerza centrífuga generada, es de:

ACERO – ACERO	$F_{sp0} = 22,893\text{ KN}$
PLA – ACERO	$F_{sp0} = 49,603\text{ KN}$

Esta diferencia está basada en la diferencia de coeficientes de fricción, ya que el resto de parámetros son iguales para ambos modelos.

Posteriormente, se han calculado las fuerzas de amarre teniendo en cuenta el movimiento del torno, con la fuerza centrífuga que se genera. Resultando los siguientes valores:

ACERO – ACERO	$F_{spz} = 32,94 \text{ KN}$
PLA – ACERO	$F_{spz} = 73,005 \text{ KN}$

Volver a comentar en este caso, que la diferencia es generada por la diferencia entre el coeficiente de fricción entre ambos contactos.

En último lugar, se calculó el valor del momento torsor generado por la fuerza de corte, este valor es igual para ambos ensayos, ya que es independiente del material del que esté fabricado el útil de amarre, siendo este valor el siguiente:

$M_{corte} = 131,25 \text{ Nm}$

5.1.2 Resultados método numérico

Una vez se ha realizado la simulación de los dos ensayos, se deben obtener dos parámetros fundamentales para valorar si el ensayo es válido o no.

En primer lugar, se debe valorar las tensiones generadas en las superficies de todo el conjunto del plato, debiéndose tratar de un valor inferior al límite elástico del material, ya que, si supera dicho valor, se producirá deformación permanente en el útil de amarre, lo que hará que sea inutilizable de nuevo debido a la pérdida de propiedades de diseño.

En segundo lugar, se debe valorar la deformación generada en el plato, ya que, para obtener una pieza de calidad razonable en el proceso de torneado, la deformación máxima que se permite en el útil de amarre es de un milímetro, ya que si este valor es mayor se pueden generar vibraciones no deseadas que reduzcan en gran valor la calidad de la pieza mecanizada.

Cabe destacar que las unidades que ANSYS indica las tensiones son en pascales, Pa, mientras que las deformaciones son en metro, m.

- Contacto acero – acero

En este apartado, se comentan y analizan los resultados obtenidos de la simulación mediante MEF del contacto acero – acero.

○ Tensiones del ensayo en contacto acero - acero

Para valorar las tensiones del ensayo, se tiene que obtener la tensión equivalente de Von-Mises; en la figura 5.1 se observa cual ha sido el resultado de esta simulación.

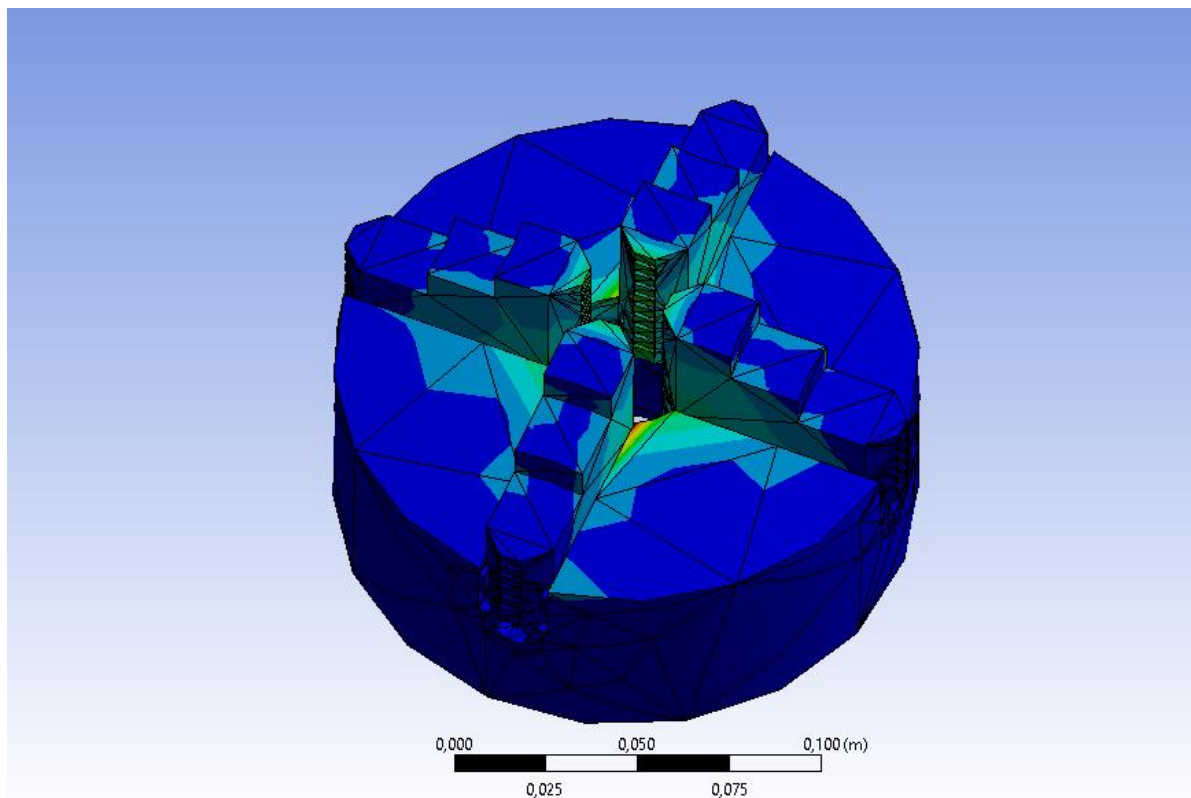


Figura 5.1 – Tensión equivalente Von-Mises en acero – acero

Fuente: Elaboración propia

Los valores de esta simulación, se puede ver en la figura 5.2

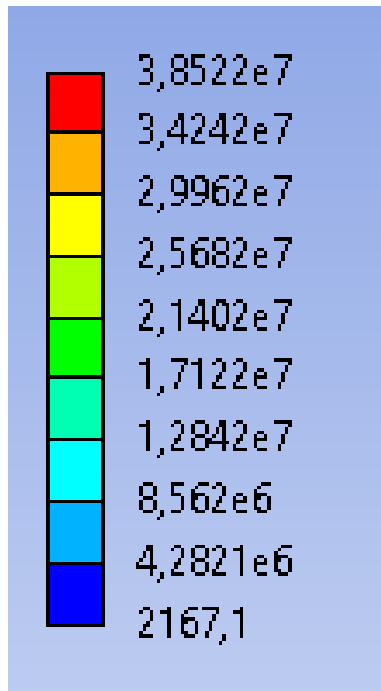


Figura 5.2 – Valor tensión equivalente Von-Mises en acero – acero

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, los valores más elevados se representan de color rojo, mientras que los menores de color azul.

El valor máximo de tensión se produce a los pies de las garras, siendo esto lógico, ya que las garras son las encargadas de amarrar la pieza y las zonas del plato en contacto con ellas son las que más sufren.

El valor máximo de tensión es de 38,522 MPa, lo que está por debajo del límite elástico del acero, que se trata de 250 MPa; esto indica que el resultado es válido, y el plato funcionaría correctamente en las condiciones estudiadas.

$$\sigma_{m\acute{a}x} \leq \sigma_{lim} = 38,522 \text{ MPa} \leq 250 \text{ MPa} \rightarrow \text{V\acute{A}LIDO}$$

○ Deformaciones del ensayo en contacto acero – acero

Para estudiar las deformaciones producidas en el ensayo, se debe valorar la deformación total producida en el útil, y compararla con el valor máximo permitido.

En la figura 5.3 se puede observar cómo están distribuidas las deformaciones a lo largo de toda la pieza.

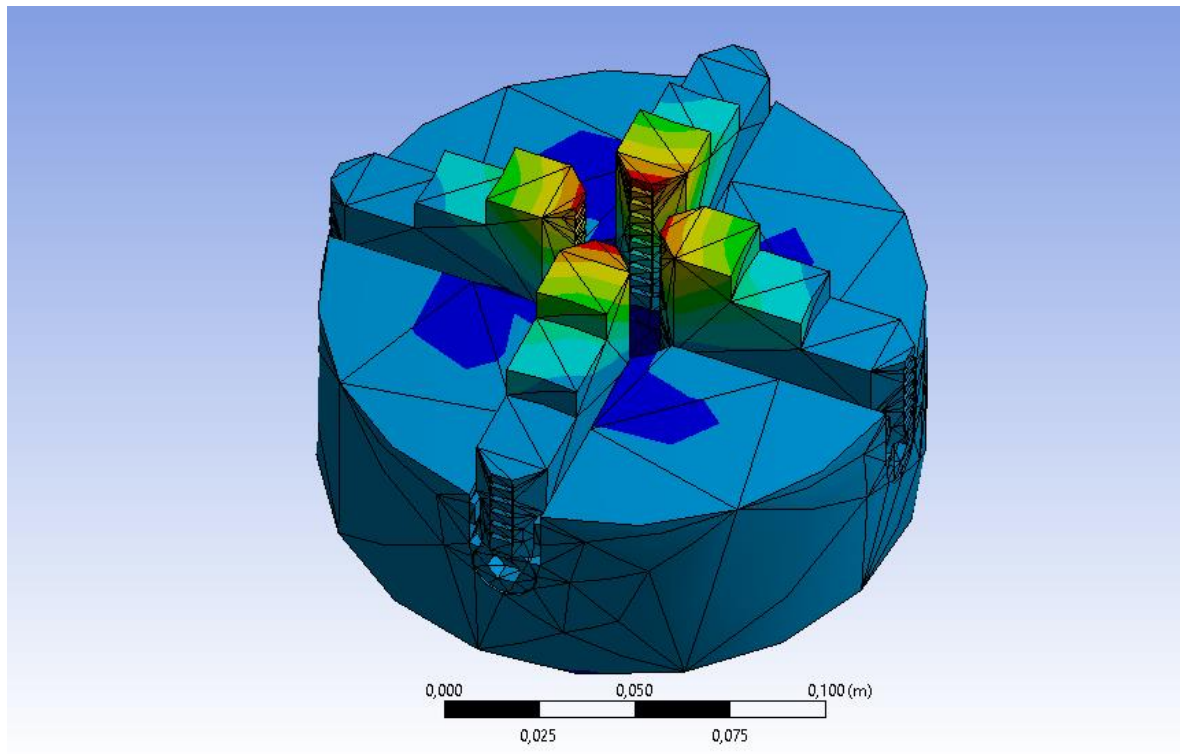


Figura 5.3 – Deformación total en acero – acero

Fuente: Elaboración propia

Los valores de esta simulación, se pueden observar en la figura 5.4

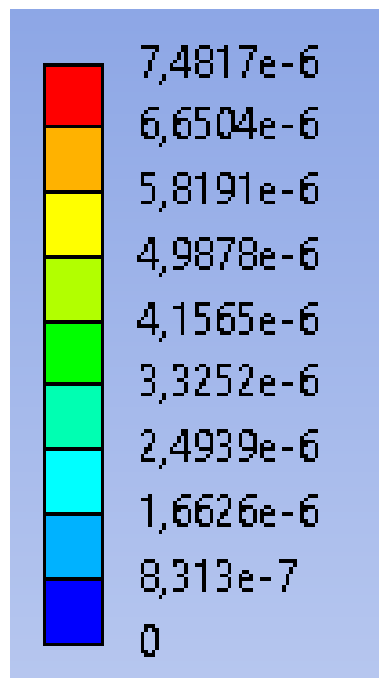


Figura 5.4 – Valores deformación total en acero – acero

Fuente: Elaboración propia

La mayor deformación se produce en la parte más elevada de la garra, lo cual tiene sentido, ya que es la parte que mayor momento torsor soporta y sufre las mayores deformaciones.

Como se observa, la mayor deformación producida en el plato de cuatro garras tiene un valor de $7,48 \cdot 10^{-6}$ m; que es mucho menor que la deformación máxima permitida, tratándose de $1 \cdot 10^{-3}$, por lo que es válido.

$$\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_{\lim} = 7,48 \cdot 10^{-6} \leq 1 \cdot 10^{-3} \rightarrow \text{VÁLIDO}$$

Por lo que, finalmente, destacar que el plato de cuatro garras fabricado en acero, basándose en las fuerzas estáticas, sí es válido para su empleo en la industria.

- **Contacto PLA – acero**

En este apartado, se comenta y analizan los resultados obtenidos de la simulación mediante de MEF del contacto acero – acero.

○ Tensiones del ensayo en contacto PLA – acero

Para valorar las tensiones del ensayo, se tiene que obtener la tensión equivalente de Von-Mises; en la figura 5.5 se observa cual ha sido el resultado de esta simulación.

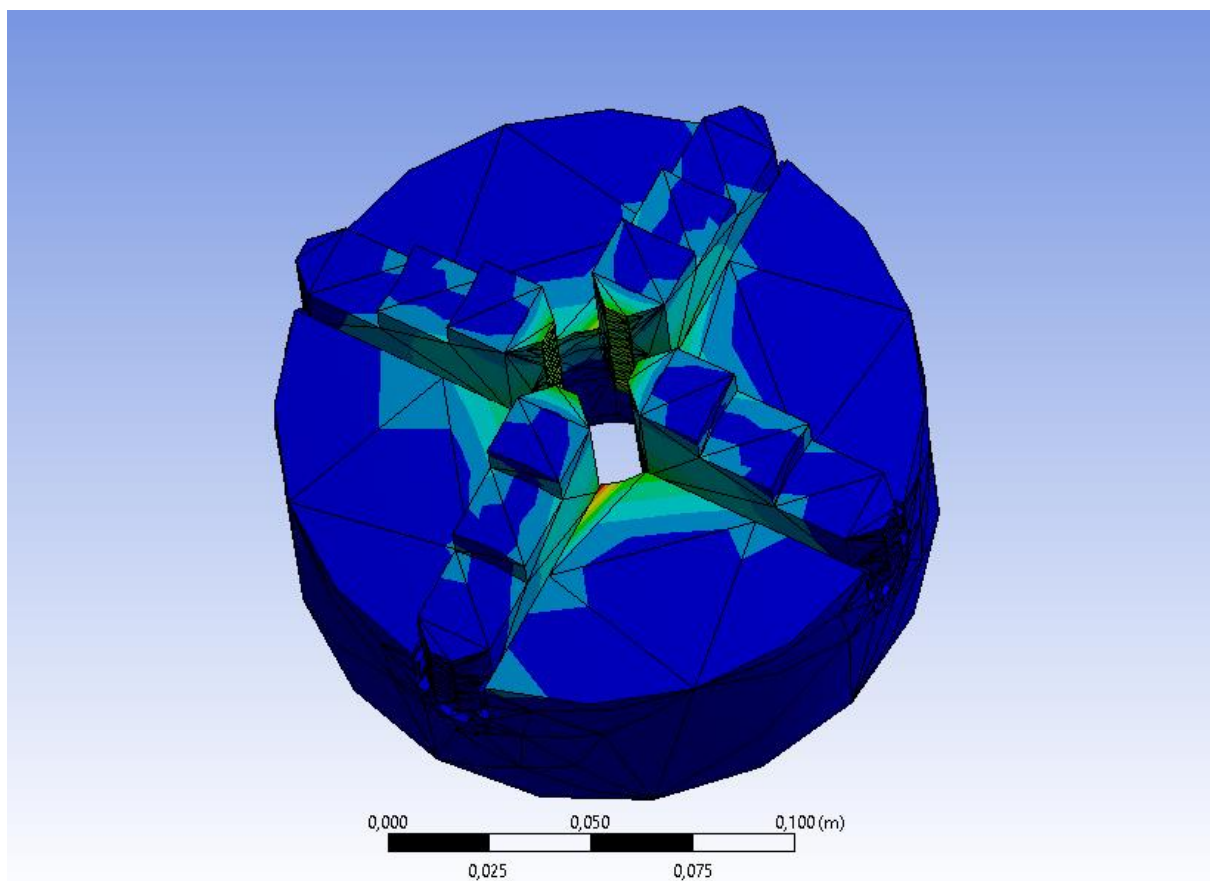


Figura 5.5 – Tensión equivalente Von-Mises en PLA – acero

Fuente: Elaboración propia

Los valores de esta simulación, se puede ver en la figura 5.6

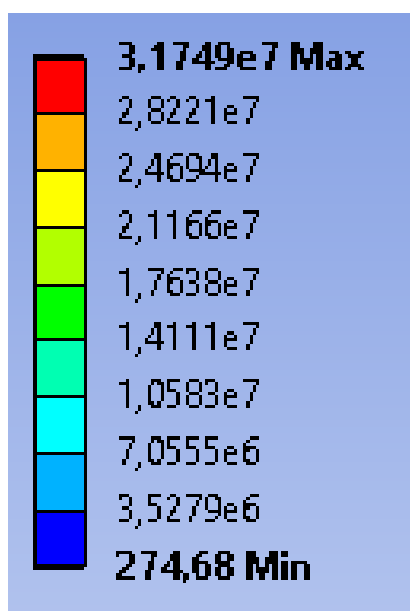


Figura 5.6 – Valor tensión equivalente Von-Mises en PLA – acero

Fuente: Elaboración propia

Como ocurría en el ensayo anterior, las mayores tensiones se producen en las zonas en contacto con las garras.

El valor máximo de tensión se trata de 31,75 MPa, siendo menor que el límite elástico del PLA, que tiene un valor de 60 MPa, por lo que, se considera válido.

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\lim} = 31,75 \text{ MPa} \leq 60 \text{ MPa} \rightarrow \text{VÁLIDO}$$

- Deformaciones del ensayo en contacto PLA – acero

Para estudiar las deformaciones producidas en el ensayo, se debe valorar la deformación total producida en el útil, y compararla con el valor máximo permitido.

En la figura 5.7 se puede observar cómo están distribuidas las deformaciones a lo largo de toda la pieza.

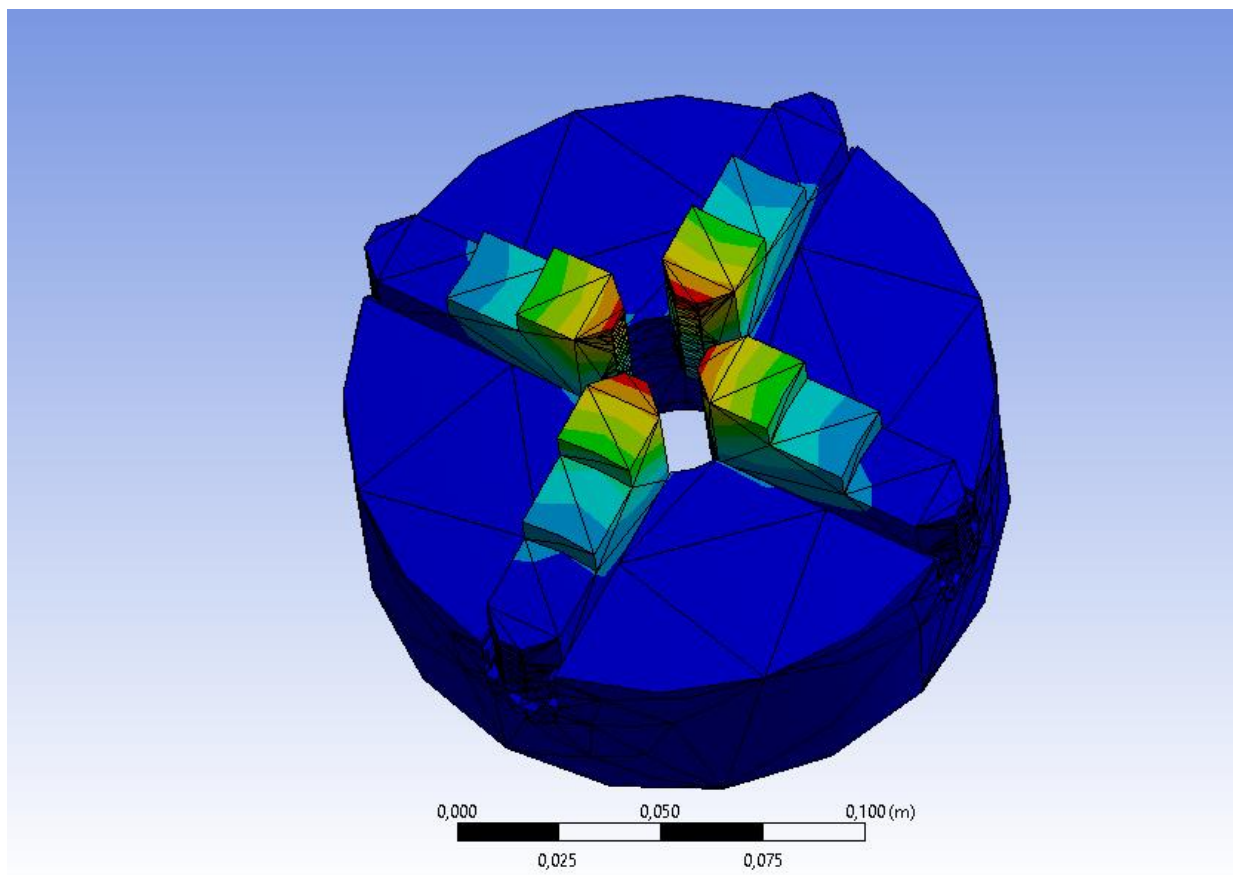


Figura 5.7 – Deformación total en PLA – acero

Fuente: Elaboración propia

Los valores de esta simulación, se pueden observar en la figura 5.8

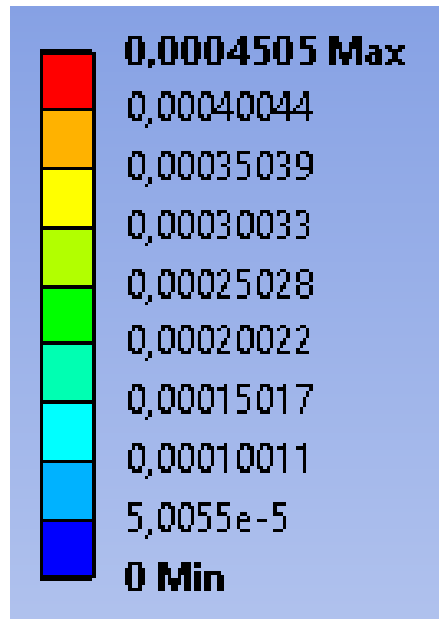


Figura 5.8 – Valores deformación total en PLA – acero

Fuente: Elaboración propia

Al igual que ocurría en el caso anterior, la mayor deformación se produce en la parte más elevada de la garra.

El valor máximo de deformación producida tiene un valor de $4,5 \cdot 10^{-4}$ m, siendo este un valor menor que el límite permitido, que se trata de $1 \cdot 10^{-3}$ m, por lo que se puede considerar un valor válido.

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} \leq \varepsilon_{l\acute{i}m} = 4,5 \cdot 10^{-6} \leq 1 \cdot 10^{-3} \rightarrow V\acute{A}LIDO$$

Finalmente, destacar que, según los cálculos realizados y las condiciones impuestas, se trata de un modelo válido que se puede ensayar dinámicamente, siendo esto uno de los objetivos marcados al inicio del proyecto.

Capítulo 6

Presupuesto

6.1 Costes para la realización del proyecto

El precio de venta final de un producto es de vital importancia para la empresa que lo desarrolla o empieza a comercializarlo. Antes de comenzar la comercialización de un producto nuevo, se debe realizar un presupuesto del coste unitario de fabricación, será hipotético, pero servirá como punto de partida.

El coste para la realización del proyecto, Cr , se divide principalmente en dos costes:

- **Costes directos:** Cd

Son aquellos costes que se pueden cuantificar y asignar inequívocamente. Se subdividen en varios términos, tales como: materias primas, Cmp ; mano de obra directa, $Cmod$; máquinas y equipos empleados, Cme .

Para el cálculo de costes directos, se aplica la siguiente fórmula:

$$Cd = Cmp + Cmod + Cme$$

- **Costes indirectos:** Ci

Son los costes que no se pueden asignar a un proceso determinado, sino que son costos necesarios para el correcto desarrollo de una empresa. Son bastantes los costes indirectos que se pueden tener, algunos de ellos son la mano de obra indirecta, el precio de la energía de iluminación, impuestos, gastos en publicidad o de mantenimiento.

Para la estimación de estos costes indirectos por pieza fabricada, se puede aplicar un coeficiente multiplicador, γ , de los costes directos unitarios, normalmente dicho coeficiente suele comprender entre el 10-13%.

Los costes indirectos se calculan de la siguiente manera:

$$Ci = \frac{\gamma}{100} \cdot Cd$$

Finalmente, el coste para la realización del proyecto se calcula como:

$$Cr = Cd + Ci$$

A continuación, se detallan los costes para la realización de este proyecto.

6.1.1 Coste directo del proyecto

Como se nombró anteriormente, los costes directos se componen de la materia prima, la mano de obra y las máquinas y equipos empleados.

- Coste de materia prima, Cmp .

En este trabajo la materia prima se compone del material empleado en la impresión 3D, el cual ha sido filamentos de PLA de la marca Ultimaker.

Para fabricar un plato completo se han empleado aproximadamente 450 gramos de materia prima, lo que supone aproximadamente el gasto por impresión de 2/3 de un filamento de PLA de 750 gramos que actualmente comercializa la empresa Ultimaker mediante diferentes distribuidores en España.

En este caso, según el comerciante INTECH 3D, el precio de este filamento, independientemente del color empleado, es de 34,65€ sin IVA.

Por lo que, si se han empleado 2/3 del material, el coste de la materia prima es el siguiente:

$$Cmp = 34,65 \cdot \frac{2}{3} = 23,1 \text{ €}$$

- **Coste de mano de obra, *Cmo*.**

Para el cálculo de la mano de obra empleada para la fabricación se ha tenido en cuenta las personas implicadas en realizar el trabajo de impresión, en este caso ha sido una única persona la encargada de la impresión en 3D.

Para calcular el tiempo en el cual se ha requerido de mano de obra, *Tmo*, se deben saber el tiempo de preparación y post-procesado por impresión, ya que mientras la impresora está funcionando, no se necesita ninguna persona que esté participando en el proceso. Cabe destacar que se no tratan de tiempos exactos.

El tiempo de preparación se compone de el tiempo que se tarda en poner a punto la impresora donde se realiza operaciones cómo la colocación del material o el calibrado de la impresora; y el tiempo que se emplea en el procesado previo donde se deben ajustar correctamente los parámetros para una buena impresión.

El tiempo de post-procesado es el tiempo empleado en la retirada del material de la impresora y los trabajos superficiales que se hacen después, como la eliminación de material soporte o de rebabas formadas de material.

En este caso, se ha estimado el tiempo de preparación alrededor de los 15 minutos por impresión y el tiempo de post-procesado alrededor de los 10 por impresión, lo que hace un total de 25 minutos por impresión. Como se indicó anteriormente, se han realizado 6 impresiones, por lo que el tiempo de mano de obra empleado es:

$$Tmo = 25 \cdot 6 = 150 \text{ minutos} = 2,5 \text{ horas}$$

Según el Convenio colectivo de empresas de ingeniería, publicado en el BOE, el salario de una persona licenciada y titulada de 2º y 3º ciclo universitario es de 1687€ en 14 pagas, lo que supone un total de 23918 €/año. La jornada ordinaria anual máxima se compone de 1800 horas, por lo que, el salario por hora, *P*, es el siguiente:

$$P = \frac{23918}{1800} = 13,29€/h$$

Finalmente, se puede calcular el coste de mano de obra como:

$$Cmo = P \cdot Tmo = 13,29 \cdot 2,5 = \mathbf{33,22 \text{ €}}$$

- **Coste de máquinas y equipos empleados, *Cme*.**

Para el desarrollo de este proyecto, se han utilizado los siguientes equipos y licencias:

- Ordenador portátil: Se ha empleado para realizar el diseño, análisis y desarrollo de la presente memoria. El ordenador utilizado es de la marca ASUS y modelo F550C, con un valor de 550€.
- Impresora 3D: Se ha empleado para la fabricación del proyecto. La impresora utilizada es la marca ULTIMAKER y modelo 3 EXTENDED, con un valor de 3730€, según el comerciante INTECH 3D.
- Licencia Microsoft Office 2010: Utilizada la licencia Microsoft Office 2010 Professional Plus, con un precio de compra de 47,9€ para uso particular, según el comerciante LOWSOFT.
- Licencia ANSYS: Se ha utilizado la licencia gratuita para estudiantes, por lo que su precio de compra es de 0€.

El coste de equipos empleado no es el coste de compra, sino el coste imputable; que se calculará teniendo en cuenta el uso dedicado en el proyecto, así como su dedicación y su periodo de vida útil correspondiente. Para calcular el coste imputable, se hará de la siguiente forma:

$$CI = Precio \cdot \frac{\text{Porcentaje de uso}}{100} \cdot \frac{\text{Periodo de uso}}{\text{Vida útil}}$$

En la tabla 6.1, se puede observar un resumen de los equipos utilizados.

Activo	Precio €	Porcentaje uso %	Periodo uso Meses	Vida útil Meses	Coste I €
Ordenador portátil	550	50	6	120	13,75
Impresora 3D	3730	100	0,133	60	8,29
SOLIDWORKS 2017	8250	100	1	12	687,5
Microsoft Office 2010	47,9	75	6	12	17,96
ANSYS	0	100	1	12	0

Tabla 6.1 – Datos de costes de equipos utilizados

Fuente: Elaboración propia

El periodo de uso de la impresora 3D fue de 4 días, suponiendo que los meses son de 30 días, el periodo de uso de la impresora en meses es de 0,133 meses.

Por lo que, finalmente, el coste de máquinas y equipos empleados en este trabajo es el siguiente:

$$Cme = 12,75 + 8,29 + 687,5 + 17,96 + 0 = \mathbf{726,5 \text{ €}}$$

- **Coste directo del proyecto, Cd.**

El coste directo del proyecto, se calcula como la suma de los valores calculados:

$$Cd = 23,1 + 33,22 + 726,5 = \mathbf{782,82 \text{ €}}$$

6.1.2 Coste indirecto del proyecto

El coste indirecto del proyecto, se calcula vez calculo el coste directo, para ello debemos darle un valor al coeficiente multiplicador, γ , explicado anteriormente; en este caso será de 10 %, por lo que:

$$Ci = \frac{\gamma}{100} \cdot Cd = \frac{10}{100} \cdot 782,82 = \mathbf{78,28 \text{ €}}$$

6.1.3 Coste total de la realización del proyecto

Finalmente, el coste total de la realización del proyecto es:

$$Cr = Cd + Ci = 782,82 + 78,28 = \mathbf{861,1 \text{ €}}$$

6.1.4 Coste de fabricación y precio de venta del producto

Si se quiere comercializar el producto, se debe obtener el coste de fabricación unitario, Cf , y un precio de venta, PVP , para ello se deben determinar los lotes de fabricación; ya que los activos como el ordenador portátil, la licencia de SOLIDWORKS 2017, la licencia de Microsoft Office 2010 y la licencia de ANSYS, no se emplean cada vez que se fabrica el producto, sino que se utilizan una vez, en el periodo de desarrollo y diseño del producto. Por lo que son considerados costes fijos, $Cfijo$, y se calculan de la siguiente forma:

$$C_{fijo} = \frac{C_{ordenador} + C_{solidworks} + C_{office} + C_{ansys}}{Lote\ de\ producto}$$

Mientras que los costes variables, $C_{variable}$, que se deben asumir por cada impresión son los siguientes:

$$C_{variable} = C_{mp} + C_{mo} + C_{impresión} = 23,1 + 33,22 + 8,29 = \mathbf{64,61\ €/u}$$

Una vez obtenido el coste unitario de fabricación, se puede obtener el precio de venta de cada unidad dependiendo de los beneficios que se deseen obtener, en este caso se quieren obtener unos beneficios del 30% por cada plato vendido. Para calcular este precio de venta, se hará de la siguiente manera:

$$PVP = \left(1 + \frac{Beneficio}{100}\right) \cdot Cf$$

Por este motivo, se van a crear tres casos hipotéticos de comercialización, para obtener el coste unitario de fabricación y precio de venta, teniendo tres lotes de fabricación del producto, uno de un único plato, uno de 10 platos y otro de 1000 platos.

- **Lote de 1 plato.**

En este caso, el coste de fabricación es el obtenido en el apartado 6.1.3, siendo 861,1 €, por lo que el precio de venta para obtener un 30% de beneficio es de:

$$PVP = \left(1 + \frac{30}{100}\right) \cdot 811,1 = \mathbf{1119,4\ €/u}$$

- **Lote de 10 platos.**

El coste directo unitario será la suma del coste fijo unitario más el coste variable unitario, sabiendo este último, se calcula el coste fijo para un lote de 10 platos de la siguiente manera:

$$C_{fijo} = \frac{13,75 + 687,5 + 17,96 + 0}{10} = \mathbf{71,92\ €/u}$$

Por lo que, el coste directo e indirecto son, respectivamente:

$$Cd_{10} = 64,61 + 71,92 = \mathbf{136,53\ €/u}$$

$$Ci_{10} = \frac{\gamma}{100} \cdot Cd = \frac{10}{100} \cdot 136,53 = \mathbf{13,65 \text{ €/u}}$$

Así mismo, el coste de fabricación es:

$$Cf_{10} = 136,53 + 13,65 = \mathbf{150,2 \text{ €/u}}$$

Finalmente, sabiendo que se quiere obtener un beneficio del 30%, se calcula el precio de venta del producto:

$$PVP = \left(1 + \frac{30}{100}\right) \cdot 150,2 = \mathbf{195,2 \text{ €/u}}$$

- **Lote de 1000 platos.**

El coste directo unitario será la suma del coste fijo unitario más el coste variable unitario, sabiendo este último, se calcula el coste fijo para un lote de 1000 platos de la siguiente manera:

$$Cfijo = \frac{13,75 + 687,5 + 17,96 + 0}{1000} = \mathbf{0,72 \text{ €/u}}$$

Por lo que, el coste directo e indirecto son, respectivamente:

$$Cd_{10} = 64,61 + 0,72 = \mathbf{65,33 \text{ €/u}}$$

$$Ci_{10} = \frac{\gamma}{100} \cdot Cd = \frac{10}{100} \cdot 65,33 = \mathbf{6,53 \text{ €/u}}$$

Así mismo, el coste de fabricación es:

$$Cf_{10} = 65,33 + 6,53 = \mathbf{71,86 \text{ €/u}}$$

Finalmente, sabiendo que se quiere obtener un beneficio del 30%, se calcula el precio de venta del producto:

$$PVP = \left(1 + \frac{30}{100}\right) \cdot 71,86 = \mathbf{93,4 \text{ €/u}}$$

Como se puede apreciar, es recomendable preparar lotes con bastantes unidades del producto, ya que de este modo se reducirán los costes fijos para cada plato, produciendo así una reducción considerable del precio de venta.

En la figura 6.1 se puede observar un gráfico con la relación PVP – cantidad de unidades, en el cual se podrá determinar el lote de producto necesario para tener el precio que nos interesa.

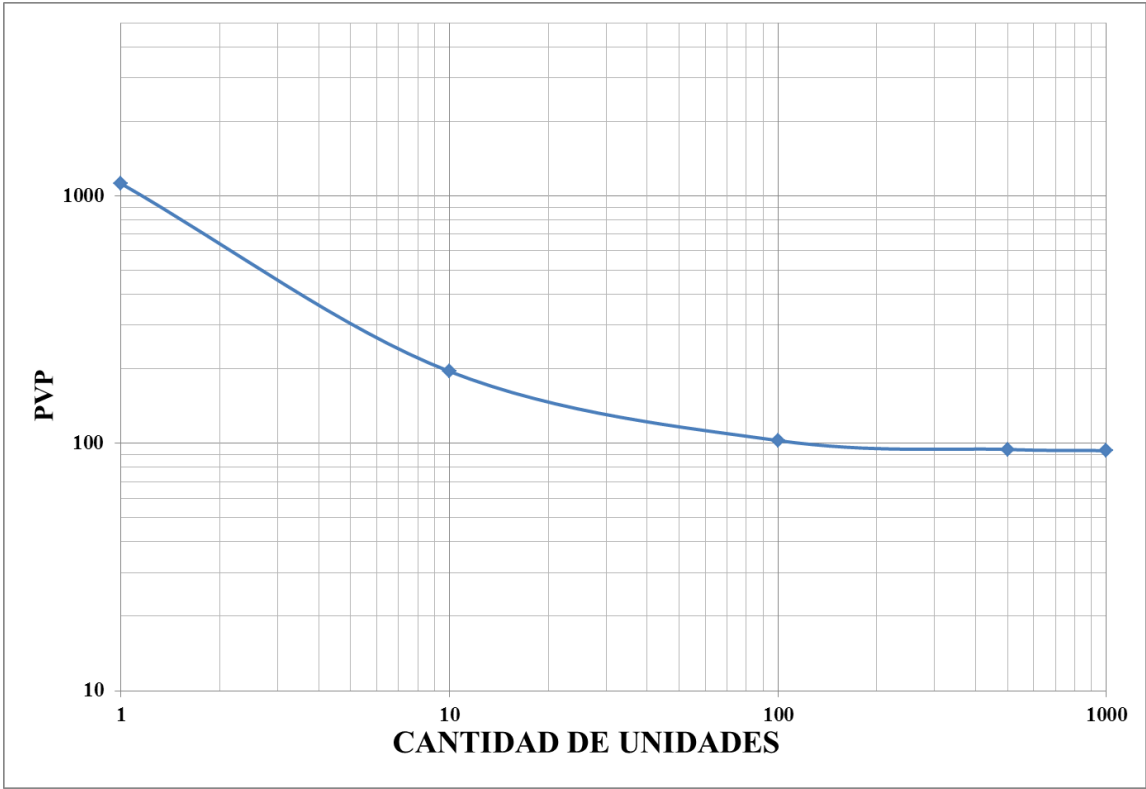


Figura 6.1 – Gráfico relación PVP vs Cantidad de unidades

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 7

Conclusiones

7.1 Conclusiones del trabajo

La realización de este trabajo está definida por el diseño en CAD del útil de amarre de plato de cuatro garras, su posterior fabricación mediante impresión 3D y el estudio mediante el modelo analítico y numérico de las fuerzas estáticas del proceso de torneado.

La mayor limitación del proyecto es la simulación de elementos finitos utilizando el software ANSYS WORKBENCH, ya que tratándose de la versión académica, el número máximo de nodos más elementos es de 32000; lo que ha provocado una simplificación del modelo estudiado, teniendo que omitir las roscas, chaflanes y redondeos; debido a esto, se puede suponer una falta de precisión a la hora de simular correctamente los ensayos; sin embargo, ha servido para sacar los órdenes de magnitud que se requieren.

Por otro lado, al comparar los resultados analíticos de los dos ensayos, se aprecia que la principal diferencia en los valores se trata del coeficiente de rozamientos entre superficies, lo que implica que, a menor coeficiente de fricción, mayor fuerza de amarre se necesita, y al ser menor el coeficiente de fricción del contacto PLA – acero, se necesita una mayor fuerza de amarre en el útil fabricado mediante PLA.

Cabe destacar, que se han alcanzado los objetivos propuestos para este proyecto, dejando realizada la primera parte de la implementación de una pieza novedosa en la industria.

7.2 Trabajos futuros

Una vez valorados los resultados obtenidos de los métodos analíticos y numéricos, se llega a la conclusión de que el modelo puede ser estudiado dinámicamente, y dependiendo de los resultados que se obtengan, se puede llegar a implementar en la industria.

De este modo, en trabajos futuros, partiendo del prototipo que se ha obtenido mediante la impresión 3D, se puede montar en un torno industrial y estudiarlo experimentalmente, y así poder contrastar los resultados obtenidos analíticamente y mediante la experiencia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] JAVIER G. JORRÍN, *España está al límite de su capacidad industrial*, publicado en “El Confidencial”, Enero de 2018.

URL: https://www.elconfidencial.com/economia/2018-01-22/capacidad-industrial-coyuntura-limite-funcionamiento-inversion_1509108/

[2] QUIQUE MARTÍNÉZ, *Tipos de mecanizados*, publicado en “UMESAL”, Diciembre de 2017.

URL: <http://umesal.com/tipos-de-mecanizado/>

[3] MARÍA VALERA MARTÍN, *Modelado y análisis de un sistema de sujeción: Aplicación a una pinza expansible*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Junio de 2012

[4] UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Tecnología mecánica, tema 1: Procesos de mecanizado, años 2017

[5] SUSANA SANCHEZ RESTREPO, *FDM o modelado por deposición fundida*, publicado en “3Dnatives”, Octubre de 2017

URL: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>

[6] ANATOL LOCKER, *9 tipos de impresoras 3D – Guía de tecnologías de impresión 3D*, publicado en “All3dp”, Enero de 2018

URL: <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>

[7] SUSANA SANCHEZ RESTREPO, *Impresión 3D por estereolitografía*, publicado en “3Dnatives”, Noviembre de 2017

URL: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>

[8] SUSANA SANCHEZ RESTREPO, *Sinterizado selectivo por láser*, publicado en “3Dnatives”, Julio de 2016

URL: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/>

[9] *Sinterizado selectivo por láser (SLS)*, publicado en “La fábrica de inventos”, en el año 2017

URL: <http://lafabricadeinventos.com/sinterizado-selectivo-por-laser-sls/>

[10] SUSANA SANCHEZ RESTREPO, *Plásticos en la impresión 3D*, publicado en “3Dnatives”, Febrero de 2018

URL: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>

[11] FÁTIMA GORDILLO, *Así son los filamentos termoplásticos para impresoras*, publicado en “Teknlife”, Noviembre de 2014

URL: <http://www.teknlife.com/reportaje/asi-son-los-distintos-y-nuevos-filamentos-termoplasticos-para-impresoras-3d/>

[12] Catálogo de materiales Plastic Jet Printing (PJP), “Ideos 3D printing Solutions”, en el año 2017

URL: <https://www.ideosprint.com/sp/materials/materials-pjp/>

[13] Catálogo de materiales estereolitografía (SLA), “Ideos 3D printing Solutions”, en el año 2017

URL: <https://www.ideosprint.com/sp/materials/materiales-sla/>

[14] Catálogo de materiales sinterizado láser (SLS), “Ideos 3D printing Solutions”, en el año 2017

URL: <https://www.ideosprint.com/sp/materials/materiales-sinterizado-laser-sls/>

[15] Catálogo impresoras 3D: *Ultimaker 3 Extended Impresora 3d doble difusor*, “Ultimaker GrupoSICNOVA”, sin fecha.

URL: <https://ultimaker.tr3sdl.com/producto/ultimaker-3-extended-impresora-3d-doble-extrusor/>

[16] LA CATARINA – UDLAP; Capítulo 2 – Principio del método de elementos finito, sin fecha.

[17] J. ARTURO MENDOZA RAZO, *Cálculo de la fuerza de sujeción en Chuck*, CIATEQ AC Campus San Luis Potosí, sin fecha.

[18] ENRIQUE SORIANO HERAS, *Modelo integral de sistemas de sujeción basados en pinzas expansibles*, Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Diciembre de 2012.

[19] ENRIQUE SORIANO HERAS, M.B. RAMIREZ BERASATEGUI, H. RUBIO ALONSO, *Modelos matemáticos para la determinación de fuerzas de amarre en mandriles expansibles*, XIX Congreso nacional de ingeniería mecánica, 2012.

[20] UNE-EN 1550: 1998+A1: 2008, *Machine-tools safety - Safety requirements for the design and construction of work holding chucks*, 2008.

[21] VDI-Richtlinie 3106. *Determination of permissible speed (rpm) of lathe chucks (jaw chucks)*, 2004.

ANEXO: PLANOS

Se adjuntan en la siguiente hoja los planos de las seis piezas diseñadas y fabricadas.

